

VŠB – Technická Univerzita Ostrava  
Fakulta strojní  
Katedra energetiky

Rekonstrukce roštového kotle na hnědé uhlí

Reconstrukcion of a Stoker-fired Boiler for  
Brown Coal

Student:	Bc. Ján Václavík
Vedoucí diplomové práce:	doc. Ing. Ladislav Vilimec

Ostrava 2014

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Ján Václavík**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Rekonstrukce roštového kotle na hnědé uhlí**  
**Rekonstrukcion of a Stoker-fired Boiler for Brown Coal**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte rešerši pro roštová ohniště
2. Proved'te stechiometrické výpočty a výpočet účinnosti kotle
3. Stanovte výrobní teplo a množství paliva
4. Navrhněte schéma zapojení výparníku
5. Stanovte teplotu na výstupu ze spalovací komory
6. Vypracujte výpočtový projekt spalovací komory

Seznam doporučené odborné literatury:

DLOUHÝ, T.: Výpočty kotlů a spalinových výměníků. Skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Ladislav Vilimec**

Datum zadání: 13.12.2013

Datum odevzdání: 19.05.2014



  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry

  
doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě: 9. 5. 2014



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 9. 5. 2014



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Ján Václavík

Adresa trvalého pobytu autora práce: Písečná 519, Ostrava-Vřesina, 742 85

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

Vypracoval: Bc. Ján Václavík

Vedoucí: doc. Ing. Ladislav Vilimec

Diplomová práce je zaměřená na řešení některých problémů plánované rekonstrukce kotle Trmice, který byl vyroben v roce 1943 a jedná se o kotel bubnový třítahový s přesuvným roštem na spalování hnědého uhlí. Původním záměrem rekonstrukce byla výměna roštu a některých teplosměnných ploch v druhém tahu kotle, ale v průběhu zpracování diplomové práce došlo ke změně rozsahu rekonstrukce a od záměru vyměnit starý rošt za nový se upustilo. Provedla se pouze výměna jeho dožitých částí a také rekonstrukce druhého tahu. Cílem této diplomové práce pak bylo přepočítat spalovací komoru na nové palivo a stanovit nové parametry při spalování tohoto paliva. Nejedná se tedy o návrh kotle, ale o přepočet kotle.

**Klíčová slova:** kotel, rošt, uhlí, rekonstrukce

## **ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS**

Author: Bc. Ján Václavík

Supervisor: doc. Ing. Ladislav Vilimec

The diploma thesis is focused on solving some of the problems the planned reconstruction of the boiler Trmice, which was manufactured in 1943 and is a three-pass boiler drum with moving grate for burning brown coal. The original intention of the reconstruction was replacement grate and some other heat transfer surfaces in second pass of boiler, but during the processing of the diploma thesis was changed the scope of reconstruction and the intention to replace the old grate for the new was abandoned. Carried out was only exchange defective parts of grate and reconstruction of second pass of boiler. The aim of this diploma thesis was perform re-count combustion chamber for the new fuel and lay down new parameters for the combustion of that fuel. It is not a draft boilers, but the re-count of the boiler.

**Key words:** boiler, grate, coal, reconstruction

**Bibliografická citace:**

Václavík, J. *Rekonstrukce roštového kotle na hnědé uhlí: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2014, 84 s.  
Vedoucí práce: doc. Ing. Ladislav Vilimec

# OBSAH

<b>SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN.....</b>	<b>9</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>13</b>
<b>2 ROŠTOVÁ OHNIŠTĚ .....</b>	<b>14</b>
2.1 FUNKCE ROŠTU PŘI SPALOVÁNÍ.....	15
2.2 TYPY ROŠTŮ .....	19
2.2.1 Pevný rovinný rošt.....	19
2.2.2 Pevný stupňovitý rošt .....	20
2.2.3 Mechanický rošt .....	20
<b>3 ZADANÉ PARAMETRY .....</b>	<b>25</b>
3.1 CÍL PRÁCE.....	25
3.2 PARAMETRY PRO VÝPOČET .....	25
<b>4 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY PRO PALIVO 1.....</b>	<b>26</b>
4.1 PŘÍBLIŽNÁ METODA URČENÍ SPOTŘEBY VZDUCHU A VZNIKLÝCH SPALIN .....	30
4.2 SOUČINITEL PŘEBYTKU VZDUCHU A OBJEMY VZDUCHU A SPALIN.....	31
4.3 ENTALPIE VZDUCHU A SPALIN .....	33
<b>5 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY PRO PALIVO 2.....</b>	<b>36</b>
5.1 PŘÍBLIŽNÁ METODA URČENÍ SPOTŘEBY VZDUCHU A VZNIKLÝCH SPALIN .....	40
5.2 SOUČINITEL PŘEBYTKU VZDUCHU A OBJEMY VZDUCHU A SPALIN.....	41
5.3 ENTALPIE VZDUCHU A SPALIN .....	43
<b>6 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK PRO PALIVO 1.....</b>	<b>47</b>
6.1 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK VE STRUSCE.....	47
6.2 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK V POPÍLKU .....	48
<b>7 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK PRO PALIVO 2.....</b>	<b>50</b>
7.1 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK VE STRUSCE.....	50
7.2 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK V POPÍLKU .....	51
<b>8 TEPELNÁ BILANCE KOTLE PRO PALIVO 1.....</b>	<b>54</b>
8.1 TEPLA PŘIVEDENÉ DO KOTLE .....	54
8.2 ZTRÁTY A TEPELNÁ ÚČINNOST KOTLE .....	55
8.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích.....	55
8.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal) .....	56
8.2.3 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí.....	56
8.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	56
8.2.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová) .....	57

8.2.6 Tepelná účinnost kotle.....	57
8.3 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY A MNOŽSTVÍ PALIVA.....	58
8.3.1 Výrobní teplo páry.....	58
8.3.2 Množství paliva .....	58
<b>9 TEPELNÁ BILANCE KOTLE PRO PALIVO 2.....</b>	<b>59</b>
9.1 TEPLA PŘIVEDENÉ DO KOTLE .....	59
9.2 ZTRÁTY A TEPELNÁ ÚČINNOST KOTLE .....	60
9.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích.....	60
9.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal) .....	61
9.2.3 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí.....	61
9.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků.....	61
9.2.5 Ztráta citelným teplem spalin (komínová) .....	62
9.2.6 Tepelná účinnost kotle.....	62
9.3 VÝROBNÍ TEPLA PÁRY A MNOŽSTVÍ PALIVA.....	63
9.3.1 Výrobní teplo páry.....	63
9.3.2 Množství paliva .....	63
<b>10 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY .....</b>	<b>66</b>
10.1 NÁVRH VELIKOSTI OHNIŠTĚ.....	66
10.2 TEPELNÝ VÝPOČET OHNIŠTĚ .....	68
10.2.1 Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště.....	68
10.2.2 Teplota nechlazeného plamene.....	69
10.2.3 Boltzmannovo číslo .....	71
10.2.4 Součinitel M .....	72
10.2.5 Součinitel tepelné efektivity stěn .....	72
10.2.6 Stupeň černosti ohniště.....	72
10.2.7 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn.....	75
<b>11 DIAGRAM PALIVA Q-A-W .....</b>	<b>76</b>
<b>12 SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝPARNÍKU .....</b>	<b>77</b>
<b>13 SCHÉMA REGULACE NAPÁJENÍ.....</b>	<b>78</b>
<b>14 ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
<b>15 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>81</b>
<b>16 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ.....</b>	<b>82</b>
<b>17 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK .....</b>	<b>83</b>
<b>18 SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>84</b>



## SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN

$A^r$	Obsah popelovin v surovém vzorku paliva	[%]
$B_o$	Boltzmannovo číslo	[1]
$C^r$	Obsah uhlíku v surovém vzorku paliva	[%]
$C_{pop}$	Obsah spalitelných látek v popílku	[%]
$C_{str}$	Obsah spalitelných látek ve strusce	[%]
$H^r$	Obsah vodíku v surovém vzorku paliva	[%]
$I_{np}^{t_{np},\alpha}$	Entalpie nechlazeného plamene	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_S^{t,\alpha}$	Entalpie spalin vzniklých spálením 1kg paliva	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_{S\min}^t$	Entalpie minimálního množství spalin	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$I_{V\min}^t$	Entalpie minimálního množství vzduchu	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$K_{1,3}$	Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kJ <sup>-1</sup> ]
$K_{2,4}$	Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$M$	Součinitel charakterizující průběh teploty po výšce ohniště	[1]
$M_{pal}$	Množství paliva přivedeného do kotle	[kJ · s <sup>-1</sup> ]
$M_{pv}$	Množství skutečné spáleného paliva	[kJ · s <sup>-1</sup> ]
$N^r$	Obsah dusíku v surovém vzorku paliva	[%]
$O^r$	Obsah kyslíku v surovém vzorku paliva	[%]
$O_{Ar}$	Objem argonu ve spalinách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{CO_2}$	Objem oxidu uhličitého ve spalinách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{H_2O}$	Skutečné množství vodní páry	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{H_2O}^S$	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{H_2O}^V$	Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{N_2}$	Objem dusíku ve spalinách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{N_2\text{ palivo}}$	Objem dusíku v palivu	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{O_2\min}$	Minimální množství kyslíku pro spálení 1kg paliva	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{SO_2}$	Objem oxidu siřičitého ve spalinách	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{SS\min}$	Minimální objem suchých spalin	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{SV}$	Skutečné množství spalin	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{SV\min}$	Minimální objem vlhkých spalin	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{VS}$	Skutečné množství spalovacího vzduchu	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{VS\min}$	Minimální množství suchého vzduchu pro spálení 1kg paliva	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$O_{VV\min}$	Minimální objem vlhkého vzduchu pro spálení 1kg paliva	[m <sub>N</sub> <sup>3</sup> · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_{CZ}$	Teplo přivedené v cizím zdroji	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_i^r$	Výhřevnost paliva	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]
$Q_{i\text{ red}}$	Redukovaná výhřevnost	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]

$Q_{nc}$	Výhřevnost uhlíku	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_s$	Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_S^{r1}$	Teplo zahrnuté v recirkulovaných spalínách	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_u$	Celkové užitečné teplo uvolněné v ohništi	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$Q_V$	Výrobní teplo páry	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}]$
$Q_{VZ}$	Teplo přivedené ve vzduchu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$R$	Plocha hořící vrstvy na roštu	$[\text{m}^2]$
$S^r$	Obsah síry v surovém vzorku paliva	$[\%]$
$S_0$	Průřez spalovací komory	$[\text{m}^2]$
$S_{st}$	Projekční povrch stěn ohniště	$[\text{m}^2]$
$S_{ús}$	Účinná sálavá plocha stěn ohniště	$[\text{m}^2]$
$T_{np}$	Teplota nechlazeného plamene	$[\text{°C}]$
$T_{ok}$	Teplota spalin na výstupu z ohniště	$[\text{°C}]$
$V_0$	Objem spalovací komory	$[\text{m}^3]$
$W^r$	Obsah vody v surovém vzorku paliva	$[\%]$
$X_{pop}$	Množství popela odváděného jako popílek	$[\%]$
$X_{str}$	Množství popela odváděného jako struska	$[\%]$
$Z_c$	Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích	$[\%]$
$Z_{co}$	Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)	$[\%]$
$Z_{cs}$	Ztráta ve škváře (strusce)	$[\%]$
$Z_{cú}$	Ztráta v úletu	$[\%]$
$Z_{fs}$	Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků	$[\%]$
$Z_k$	Ztráta citelným teplem spalin (komínová)	$[\%]$
$Z_{sv}$	Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí	$[\%]$
$a_0$	Stupeň černosti ohniště	$[1]$
$a_{pl}$	Stupeň černosti plamene	$[1]$
$a_{ú}$	Poměrný úlet popílku z ohniště	$[\%]$
$cp_{H_2O}$	Měrná tepelná kapacita vodní páry	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$cp_{VS}$	Měrná tepelná kapacita suchého vzduchu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$cp_{VV}$	Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$c_s$	Měrná tepelná kapacita strusky	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$
$d$	Obsah vody na 1kg suchého vzduchu	$[\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$d_{pk}$	Střední efektivní průměr části popílku	$[\mu\text{m}]$
$i_l^t$	Entalpie jednotlivých složek spalin při teplotě „t“	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{NV}$	Entalpie napájecí vody	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{ODL}$	Entalpie odluhu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{pp}$	Entalpie přehřáté páry	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{pv}$	Fyzické teplo přivedené v palivu	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$i_{VS}^t$	Entalpie suchého vzduchu při teplotě „t“	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$

$k$	Součinitel zeslabení sálání	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
$k_s \cdot r_s$	Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
$k_p \cdot \mu_{pk}$	Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi	$[\text{m}^{-1} \cdot \text{MPa}^{-1}]$
$m_{odl}$	Množství odluhu	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$m_{pp}$	Množství páry	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$
$p$	Tlak spalin v ohništi	$[\text{MPa}]$
$p''$	Parciální tlak vodní páry na mezi sytosti	$[\text{MPa}]$
$p_c$	Celkový tlak	$[\text{MPa}]$
$p_{pp}$	Tlak páry	$[\text{MPa}]$
$p_s$	Parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách	$[\text{MPa}]$
$\bar{q}$	Střední tepelné zatížení stěn ohniště	$[\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}]$
$q_s$	Průřezové tepelné zatížení ohniště	$[\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}]$
$q_v$	Objemové tepelné zatížení ohniště	$[\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}]$
$r_{\text{H}_2\text{O}}$	Objemový podíl vody ve spalinách	[1]
$r_s$	Objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách	[1]
$s$	Účinná tloušťka sálavé vrstvy	$[\text{m}]$
$t_{np}$	Teplota nechlazeného plamene	$[\text{°C}]$
$t_{NV}$	Teplota napájecí vody	$[\text{°C}]$
$t_{ok}$	Teplota spalin na výstupu ohniště	$[\text{°C}]$
$t_{pp}$	Teplota páry	$[\text{°C}]$
$t_s$	Teplota škváry, strusky	$[\text{°C}]$
$t_{sp}$	Teplota spalin za kotlem	$[\text{°C}]$
$t_{vz}$	Vztažná teplota, teplota vzduchu	$[\text{°C}]$
$x$	Úhlový součinitel osálání trubkové stěny	[1]
$\Theta_{ok}$	Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště	[1]
$\chi_v$	Součinitel vyjadřující podíl vodní páry na $1\text{m}^3$ suchého vzduchu	[1]
$\bar{\Psi}$	Střední hodnota součinitele tepelné efektivity	[1]
$\alpha (\alpha_{ok})$	Přebytek vzduchu ve spalovací komoře	$[\%]$
$\alpha_k$	Přebytek vzduchu za kotlem	$[\%]$
$\zeta$	Součinitel zanesení stěn ohniště	[1]
$\eta_k$	Tepelná účinnost kotle	$[\%]$
$\kappa_1$	Součinitel závislý na druhu paliva	[1]
$\kappa_2$	Součinitel závislý na způsobu spalování	[1]
$\mu_{pk}$	Koncentrace popela ve spalinách	$[\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}]$
$\varphi$	Relativní vlhkost vzduchu, součinitel uchování tepla	$[\%], [1]$
$\omega_{Ar}$	Objemový podíl argonu ve spalinách	$[\%]$
$\omega_{\text{CO}_2}$	Objemový podíl oxidu uhličitého ve spalinách	$[\%]$
$\omega_{\text{H}_2\text{O}}$	Objemový podíl vody ve spalinách	$[\%]$

$\omega_{\text{N}_2}$	Objemový podíl dusíku ve spalínách	[%]
$\omega_{\text{O}_2}$	Objemový podíl kyslíku ve spalínách	[%]
$\omega_{\text{SO}_2}$	Objemový podíl oxidu siřičitého ve spalínách	[%]
$(\text{CO}_2)_{\text{max}}$	Maximální množství oxidu uhličitého ve spalínách	[%]
$(\text{O}_S \bar{c}_S)_0$	Střední tepelná jímavost spalin v ohništi	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$

# 1 ÚVOD

Spalovací komora parního kotle je prostor, který je vymezený vodou chlazenými nebo nechlazenými keramickými stěnami, v němž dochází ke spalování paliva, ze kterého se má uvolnit potřebné množství tepla.

Ohniště pak je soubor zařízení potřebných pro spalování přivedeného paliva a zahrnuje spalovací komoru, rošt nebo hořáky, přívod paliva, odvod tuhých zbytků a vzduchový systém. Podle druhu spalovaného paliva se dělí na ohniště ke spalování tuhých, kapalných a plyných paliv, popř. kombinovaná ohniště, která slouží pro spalování různých paliv odděleně nebo současně (např. ohniště na uhlí a biomasu nebo uhlí a zemní plyn a těžký topný olej atp.). Ohniště na tuhá paliva se podle způsobu spalování dělí na roštová ohniště, kde se palivo spaluje v nehybné vrstvě, nebo prášková, kde se tuhé palivo spaluje ve formě prášku v únosu v prostoru ohniště, nebo fluidní, kde se drcené palivo spaluje ve fluidní vrstvě (v kypící vrstvě). Prášková ohniště můžeme dále dělit podle způsobu přeměny popelovin v ohništi na ohniště granulační, kdy popelovina z ohniště odchází ve formě škváry, nebo na ohniště výtavná, z nichž popelovina odchází ve formě tekuté strusky.

Každé spalovací zařízení musí při každém výkonu zajistit spálení přiváděného paliva s optimálním přebytkem spalovacího vzduchu, při dosažení nejlepší možné účinnosti spalování. Při spalovacím procesu vznikají zplodiny hoření, které přicházejí do styku s výhřevnými plochami. Tyto zplodiny nesmí zkracovat provozní periodu zařízení, např. tvorbou nánosů, korozí, ucpáváním odsávacích a výpustných otvorů atp.

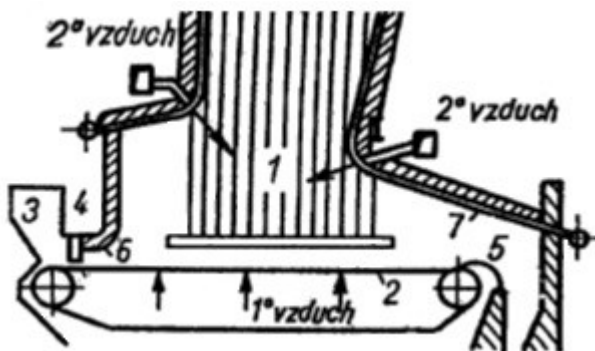
## 2 ROŠTOVÁ OHNIŠTĚ

Nejstarším typem průmyslového ohniště je ohniště roštové. Toto ohniště slouží ke spalování kusových paliv v nehybné vrstvě. Při tomto spalování leží palivo na roštu ve vrstvě, jejíž tloušťka se volí v závislosti na tepelném výkonu ohniště a prodyšnosti vrstvy pro spalovací vzduch.

Základní části roštového ohniště můžeme vidět na Obr. 2. 1 a jsou to:

- spalovací prostor (vymezený stěnami, přední a zadní klenbou a roštem)
- rošt
- palivová násypka
- palivové hradítko
- škvárový jízek
- škvárová výsypka
- zařízení pro přívod a regulaci vzduchu

Rošt je tvořen nosnou konstrukcí, roštnicemi a u mechanických roštů taky hnacím ústrojím.



Obr. 2. 1 Hlavní části roštového ohniště [3]

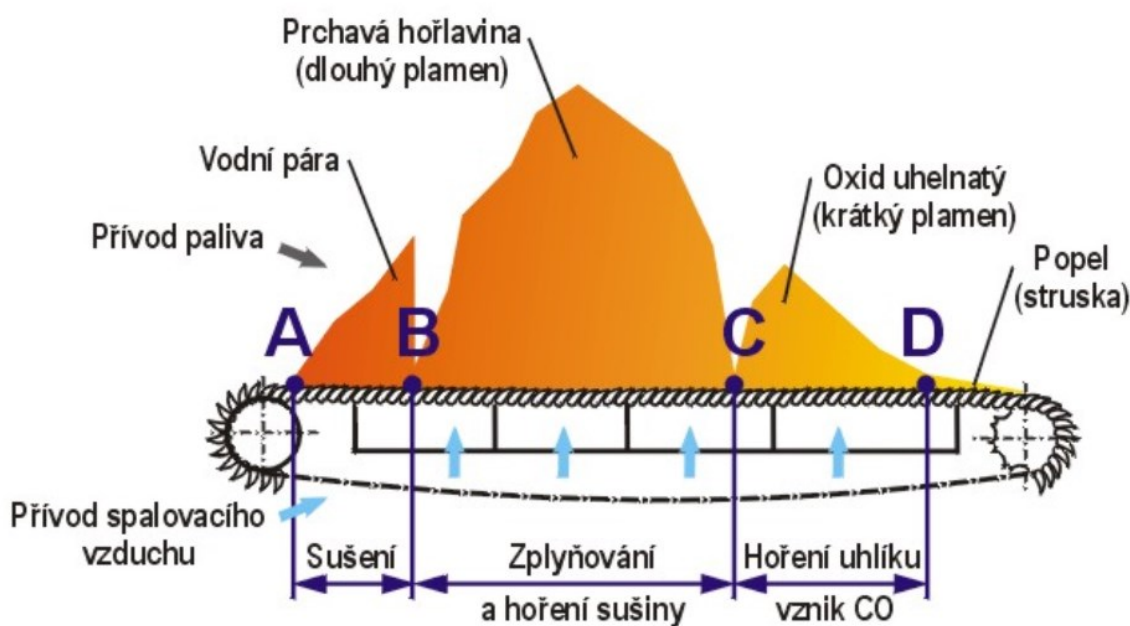
- |                      |                  |                 |             |
|----------------------|------------------|-----------------|-------------|
| 1) spalovací prostor | 2) rošt          | 3) násypka      | 4) hradítko |
| 5) škvárový jízek    | 6) přední klenba | 7) zadní klenba |             |

## 2.1 Funkce roštu při spalování

- podpírat spalované palivo a umožnit, aby se z něho vytvořila vrstva požadované tloušťky a prodyšnosti
- zajistit přívod spalovacího vzduchu do jednotlivých míst plochy roštu tak, aby spalování probíhalo při optimálním přebytku vzduchu
- umožnit postupné vysušení, zahřátí na zápalnou teplotu, hoření a dokonalé vyhoření zrn paliva
- shromažďovat, popř. zajišťovat odvod tuhých zbytků po spalování z ohniště
- regulovat svůj tepelný výkon podle požadovaného výkonu kotle

Spalované palivo ležící na roštu prochází postupně několika fázemi, a to sušením, odplyňováním prchavé hořlaviny, zapálením, hořením a dohoříváním paliva, kde tyto jednotlivé fáze u pevných roštů a roštů s pohazováním následují za sebou ve směru výšky vrstvy a u roštů pásových a přesuvných za sebou ve směru délky roštu.

Spalování u roštových ohnišť probíhá ve vrstvě na roštu (tuhý uhlík – koks) a v prostoru spalovací komory nad vrstvou paliva (na začátku roštu – uhlovodíky, v další části roštu popř. CO). Průběh spalování a rozložení plamene je znázorněno na Obr. 2. 2.

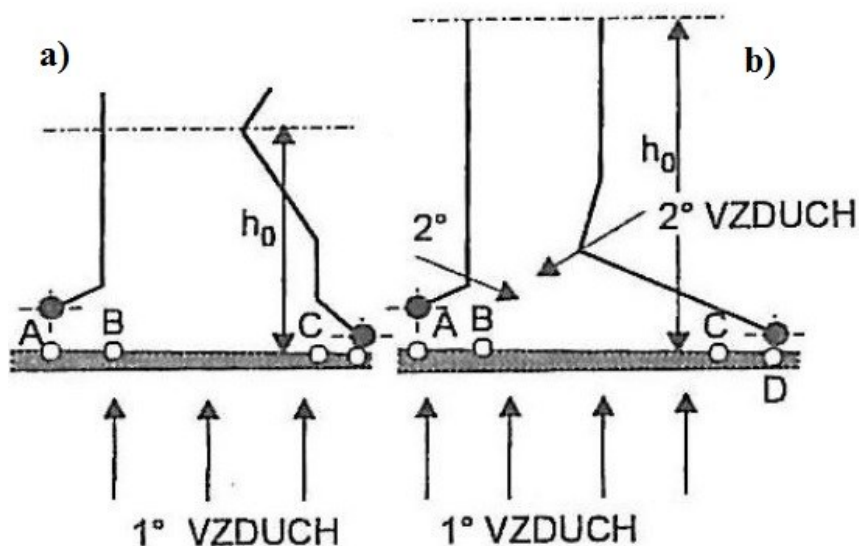


Obr. 2. 2 Rozložení plamene nad roštem [2]

Čím bude větší obsah prchavé hořlaviny v palivu, tím bude větší podíl hoření složek paliva v prostoru.

Hnědá uhlí hoří mohutným svítivým plamenem, vyplňující prostor ohniště vysoko nad rošt, kdežto antracit a koks hoří krátkým nesvítivým a namodralým plamenem. Pokud přijdou hořící uhlovodíky prchavé hořlaviny v podobě plamene do styku s chladnou výhřevnou plochou (teplota stěny menší než  $450^{\circ}\text{C}$ ), ochladí se a dochází k jejich rozkladu na  $\text{H}_2$  a C, kdy má vzniklý amorfni uhlík vyšší zápalnou teplotu, proto nevyhoří a ukládá se na výhřevných plochách v podobě sazí. Z tohoto důvodu máme dva typy roštových ohnišť, kde prvním typem je roštové ohniště s jedním ohniskem (pro paliva s nízkým obsahem prchavé hořlaviny) a druhým typem je ohniště s dvěma ohnisky hoření (pro paliva s velkým obsahem prchavé hořlaviny).

Jak můžeme vidět na Obr. 2. 3, ohniště s jedním ohniskem hoření je výrazně nižší (je zde kratší délka plamene, nehrozí nebezpečí tvorby sazí), širší a s krátkou zadní klenbou, kdežto ohniště na palivo s velkým obsahem prchavé hořlaviny, tedy s dvěma ohnisky hoření, je vysoké, má dlouhou zadní klenbu a bývá seškrcené, aby byla zajištěna dostatečná délka plamene a bylo zaručeno dobré promíchávání prchavé hořlaviny se spalovacím vzduchem. Pro tento účel se většinou do seškrceného místa nad zadní klenbou a někdy i do přední klenby instalují hubice pro přívod sekundárního vzduchu, což má za následek, že podíl primárního vzduchu, který přivádíme pod rošt do vrstvy, bude tím menší, čím vyšší bude obsah prchavé hořlaviny v palivu. Toto rozdělení se používá při spalování hnědého uhlí a lignitu, kdežto při spalování černého uhlí a antracitu je použití sekundárních vzduchů motivováno spíše aplikací primárních opatření ke snížení  $\text{NO}_x$ .



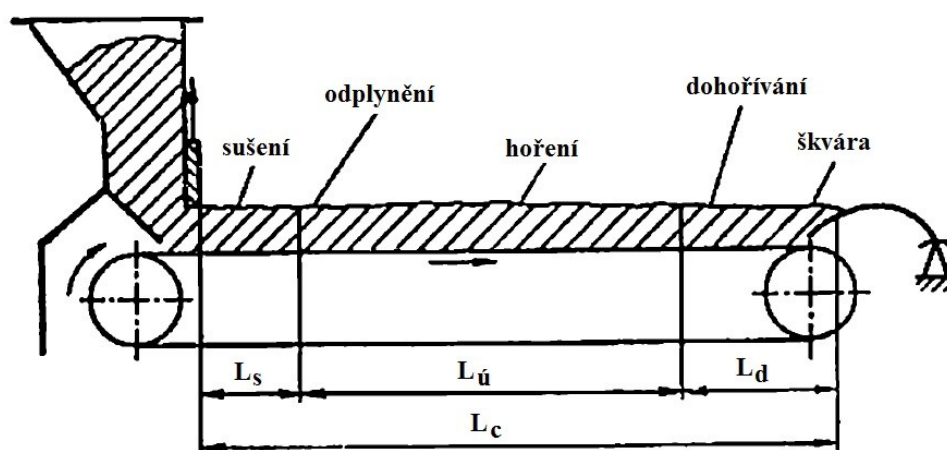
Obr. 2. 3 Tvar roštového ohniště [2]

- a) černé uhlí, antracit
- b) hnědé uhlí, lignit



V případě roštů s mechanickým či pneumatickým pohazováním se spalování prchavé hořlaviny a zčásti i spalování jemných zrn přesouvá do druhého ohniska hoření, kde se malá zrna při letu ohništěm stačí nejen vysušit a vznítit, ale většinou i dohořet. Všechny fáze přípravy a hoření ve vrstvě na roštu prodělávají jen ty největší zrna paliva, zatímco u středně velkých zrn (částic) dochází při jejich letu k částečnému vysušení, popř. odplynění, někdy i k částečnému vyhoření. Zbytek reakce pak proběhne na roštu.

Roštová ohniště se rozlišují podle způsobu, jakým přivádíme teplo potřebné k vysušení a vznícení paliva na ohniště s horním, spodním, nebo obojím zápalem. Ohniště s horním zápalem využívá sálání obezdívky, hlavně u přední (vzněcovací) klenby a sálání plynného obsahu samotného ohniště, kdežto ohniště se spodním zápalem funguje na principu, že se nové palivo nahazuje na žhavou hořící vrstvu, nebo se dmýchá vysoce ohřátý spalovací vzduch či spaliny pod rošt. U ohnišť, u kterých dochází k promíchávání vrstvy paliva, můžeme také hovořit o spodním zápalu.



Obr. 2. 4 Celková délka  $L_c$ , účinná délka  $L_u$  a pomocná délka roštu ( $L_s$  – sušení,  $L_d$  – dohořívání) [2]

K uvolňování tepla z paliva (tj. vlastnímu hoření) dochází z celkové roštové plochy jen na tzv. účinné ploše (délce) roštu, která je znázorněna na Obr. 2. 4 a zbylé části roštové plochy jsou pouze pomocné a mají za úkol připravit palivo na zapálení a jeho následné dohoření.

S rostoucím obsahem vody v palivu a nižší teplotou spalovacího vzduchu bude klesat poměr účinné plochy k celkové ploše (délce) roštu, což znamená, že s rostoucím obsahem vody v palivu bude klesat výkon kotle. Poklesu výkonu kotle lze zabránit předsoušením paliva a to buď mimo kotel, nebo v sušicí spalínové šachtě, popř. dmýcháním horkého vzduchu či spalin do sušicí oblasti roštu. V případě, že je spalovací vzduch dmýchán pod rošt, dochází k jeho ohřevu jen do 150°C. Pokud by se vzduch ohříval na vyšší hodnotu, docházelo by k opalování roštnic. Pouze v případě, kdy se spaluje velmi mokré palivo, může být spalovací vzduch přiváděn do prvního pásma s teplotou ohřevu až na 250°C. Použitím pohazovacího zařízení, které slouží k sušení a přípravě paliva pro spalování v letu, ještě před dopadem na rošt, můžeme při spalování mokrého paliva zkrátit neúčinnou délku roštu.

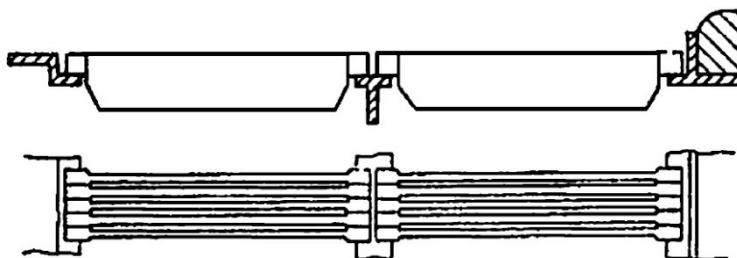
Palivo, které je přivedeno na rošt, se většinou všechno úplně nespálí, protože dojde k tomu, že část paliva propadne mezerami mezi roštnicemi a část zůstane ve škváře ve formě odplyněného uhlí (koks) jako mechanický nedopal. Obecně platí, že čím jsou větší mezery mezi roštnicemi a drobnější palivo, tím je vyšší propad a čím vyšší je obsah popelovin v palivu, tím více nedopalu bude ve škváře. Propad je možno snížit použitím tříděného paliva (bez prachové frakce), dnes převážně použitím bezpropadových roštnic či dvouvrstvého spalování, popř. vrácením propadu pneumaticky do ohniště nebo pohazováním paliva. Dochází také k úletu, tj. že část paliva té nejjemnější frakce ulétává z vrstvy se spalinami, kdy s rostoucím obsahem prachových částic a rychlostí spalovacího vzduchu poroste i celkový úlet.

## 2.2 Typy roštů

Způsobem, jakým se pohybuje palivo v ohništi, rozlišujeme rošty s nehybnou vrstvou (např. pevný rovinný rošt), rošty s přerušovaným přemísťováním vrstvy (např. přesuvný rošt) a s vrstvou trvale se posouvající (např. pásový rošt).

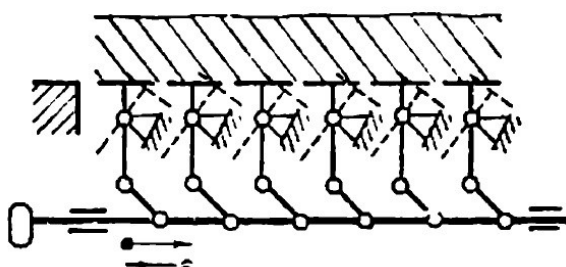
### 2.2.1 Pevný rovinný rošt

Pevný rovinný rošt je znázorněn na Obr. 2. 5 a je složen z litinových desek, ve kterých jsou umístěny otvory pro vzduchu nebo je složen z řad vedle sebe a za sebou umístěných roštnic, které mají tvar štíhlých nosníků. Roštnice jsou vyrobeny z žárovečné litiny a během procesu hoření jsou vystaveny mechanickému a tepelnému namáhání, proto musí být dostatečně tuhé.



Obr. 2. 5 Roštnice pevného rovinného roštu [2]

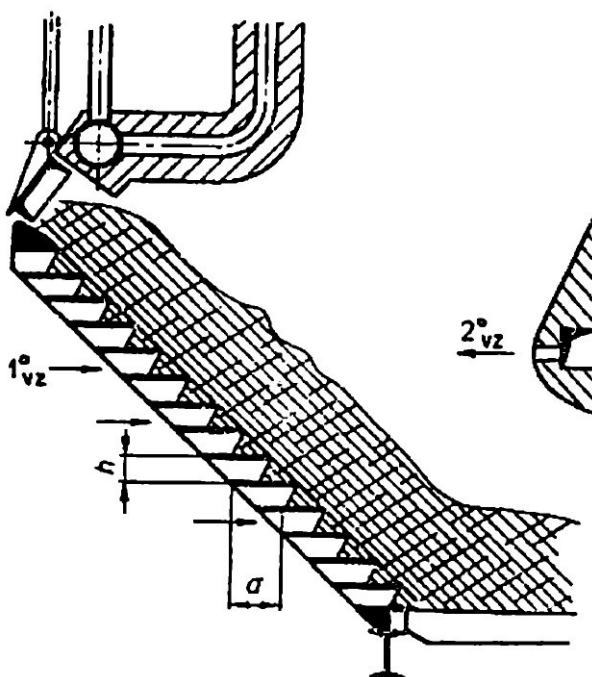
Aby nedocházelo k propadu paliva skrz rošt, musí být mezera mezi roštnicemi poměrně úzká, avšak dostatečně velká pro přívod vzduchu. Přiváděný vzduch touto mezerou má za úkol ochlazovat roštnice, a proto musí mít roštnice dostatečně velký povrch pro odvod tepla, jinak by docházelo k jejich opalování. Spalovací zařízení s pevným roštem a s ruční obsluhou je určeno spíše pro malé výkony. Pro dosažení vyšších výkonů bylo od ruční obsluhy upuštěno, jelikož topič již nestačil přikládat palivo, a tak byla ruční obsluha nahrazena mechanickým pohazovačem paliva s přerušovaným provozem. K odstranění škváry z roštu je možno použít polomechanický způsob, což představuje pákový systém, kterým lze sklopit roštnice tak, že škvára mezi nimi propadne. Příklad použití tohoto systému je u roštu se sklopnými roštnicemi, Obr. 2. 6, používaný např. u parních lokomotiv.



Obr. 2. 6 Rovinný rošt se sklopnými roštnicemi [2]

### 2.2.2 Pevný stupňovitý rošt

U tohoto typu roštu se přikládání paliva a odvod škváry děje za pomoci souvání. Stupňovitý rošt je znázorněn na Obr. 2. 7. Skládá se ze šikmé části, kde se palivo vysušuje, uvolňují se z něho plyny, které následně hoří a z vodorovné části, kde dochází k dohoření pevného zbytku paliva. Palivo se pohybuje ve směru působení zemské gravitace, tj. z násypky přes hradítko, kterým se provádí regulace tloušťky vrstvy a následně postupuje do ohniště až k dohořivacímu rovinnému roštu.



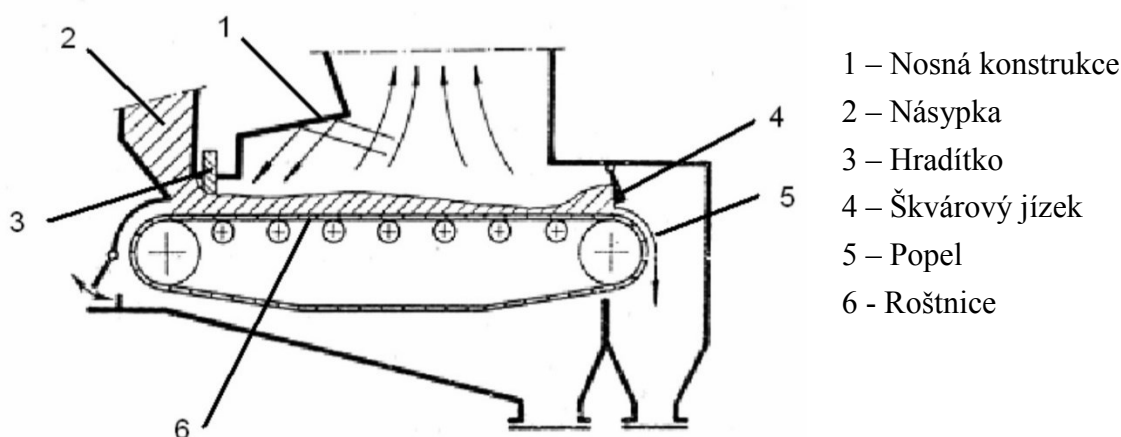
Obr. 2. 7 Pevný stupňovitý rošt [2]

Mezi jednotlivými stupni roštu, na kterých leží palivo, jsou umístěny regulační otvory, kterými se přivádí primární vzduch. Pevný stupňovitý rošt je vhodný zejména pro spalování paliv s větším obsahem prchavé hořlaviny a s větším obsahem prachové frakce.

### 2.2.3 Mechanický rošt

Ohniště s mechanizovaným rostem jsou vhodná především pro použití u kotlů s větším výkonem, u kterých se odstraňování popela provádí mechanicky. Prvním typem mechanického roštu byl rošt řetězový, jehož roštnice tvořily články širokého Gallova řetězu. Hlavní nevýhoda toho roštu spočívala v tom, že pokud jsme potřebovali vyměnit spálenou roštnici, museli jsme rozebrat celý řetěz.

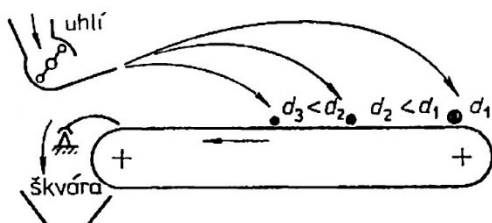
Modifikací řetězového roštu vznikl rošt pásový, Obr. 2. 8, který využívá Gallův řetěz pouze jako tažný element na vnějších krajích plochy roštu.



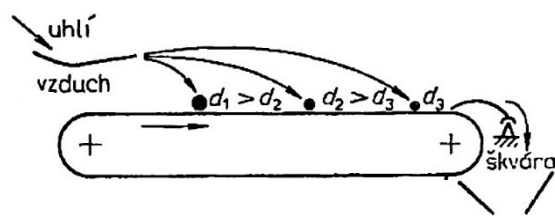
Obr. 2. 8 Pásový rošt [4]

Aby nedocházelo k prohýbání řetězů pod tíhou roštnic a paliva, je na každém čepu umístěna kladka, která se odvaluje při pohybu řetězu po kolejnicích. Vrstva paliva na roštu je regulována hradítkem a na konci roštu je tzv. škvárový jízec, který zabraňuje vnikání falešného vzduchu do ohniště a současně zadržuje škváru na roštu, aby dohořela.

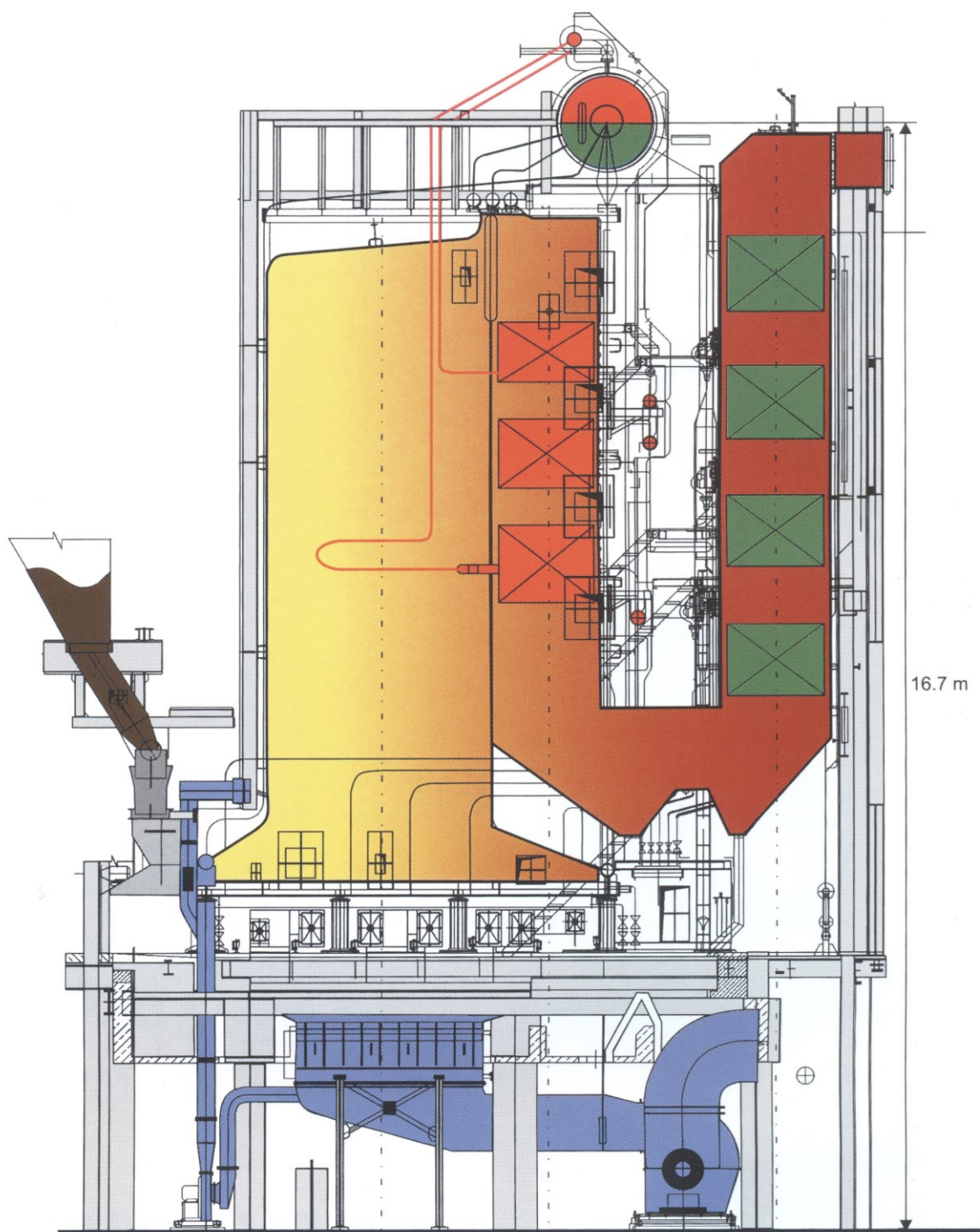
Pro palivo s velkým obsahem prachu se používají pásové rošty v kombinaci s pohazovacím zařízením, a to mechanickým nebo pneumatickým. Při použití mechanického pohazování, Obr. 2. 9, dopadají velké částice paliva na zadní konec roštu a menší částice paliva, které neshoří v letu, dopadají čím blíže k pohazovači, čímž jsou menší. Proto musí být smysl pohybu pásového roštu směrem k pohazovači a škvárová výsypka umístěna pod pohazovačem. U pneumatického pohazování, Obr. 2. 10, se palivo pohazuje proudem tlakového vzduchu, takže větší částice dopadají blíže k pohazovači a drobnější dále od pohazovače na pás. Smysl pohybu pásu je v tomto případě od pohazovače směrem k výsypce, která je umístěna na konci pásového roštu.



Obr. 2. 9 Pohyb pásu při mechanickém pohazování [2]

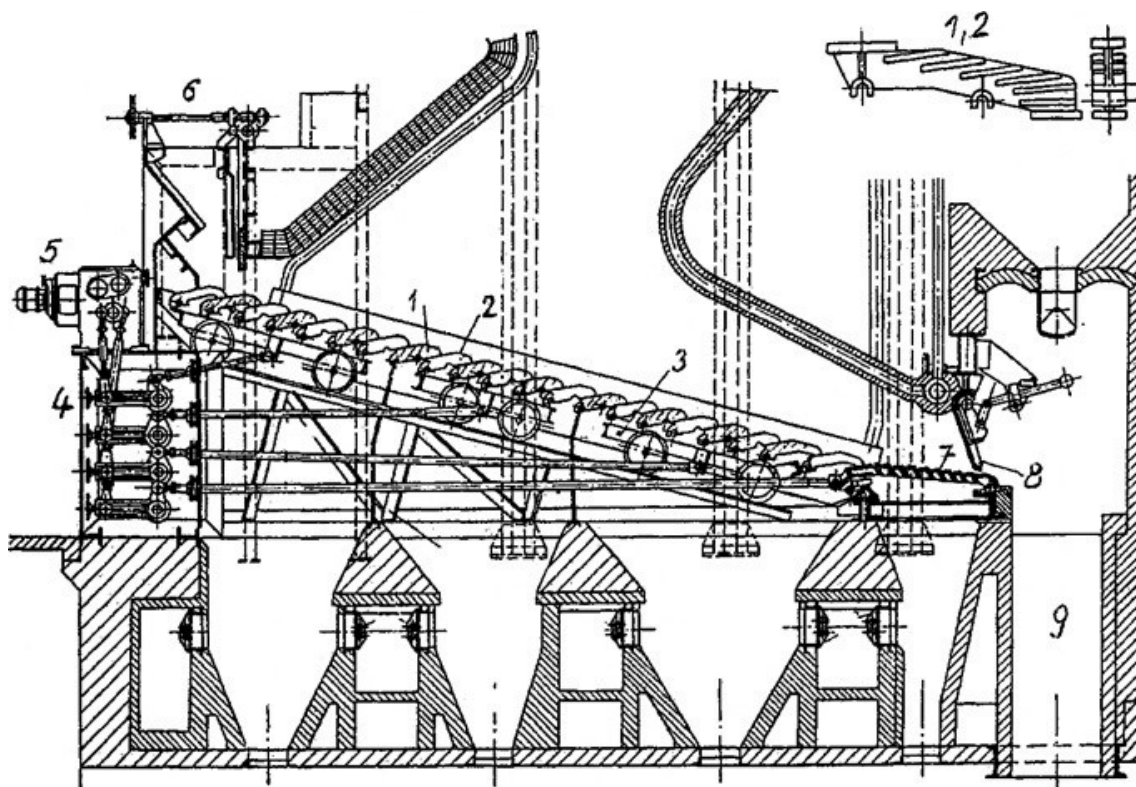


Obr. 2. 10 Pohyb pásu při pneumatickém pohazování [2]



Obr. 2. 11 Kotel typu OR-35N s pásovým roštem firmy Rafako [5]

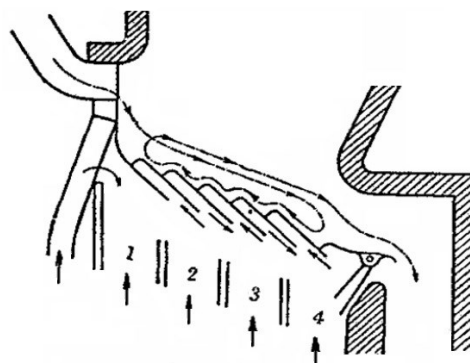
Dalším typem roštu, na němž lze spalovat i paliva s větším obsahem prachu je rošt přesuvný, Obr. 2. 12. Jedná se rošt, který vznikl mechanizací pevného stupňovitého roštu a to tak, že pevné roštové stupně byly nahrazeny pohyblivými. Všechny sudé stupně bývají pevně připojeny k rámu a všechny liché stupně jsou připojeny na vozíky poháněné přímočaře vratně, např. pomocí klikového mechanismu s elektromotorem.



Obr. 2. 12 Přesuvný rošt [4]

- |                               |                        |                      |
|-------------------------------|------------------------|----------------------|
| 1 – pevné roštnice            | 2 – pohyblivé roštnice | 3 – pohyblivé vozíky |
| 4 – klikový mechanismus       | 5 – elektromotor       | 6 – palivová výsypka |
| 7 – vodorovný dohořívací rošt | 8 – výkyvný škrabák    | 9 – škvárová výsypka |

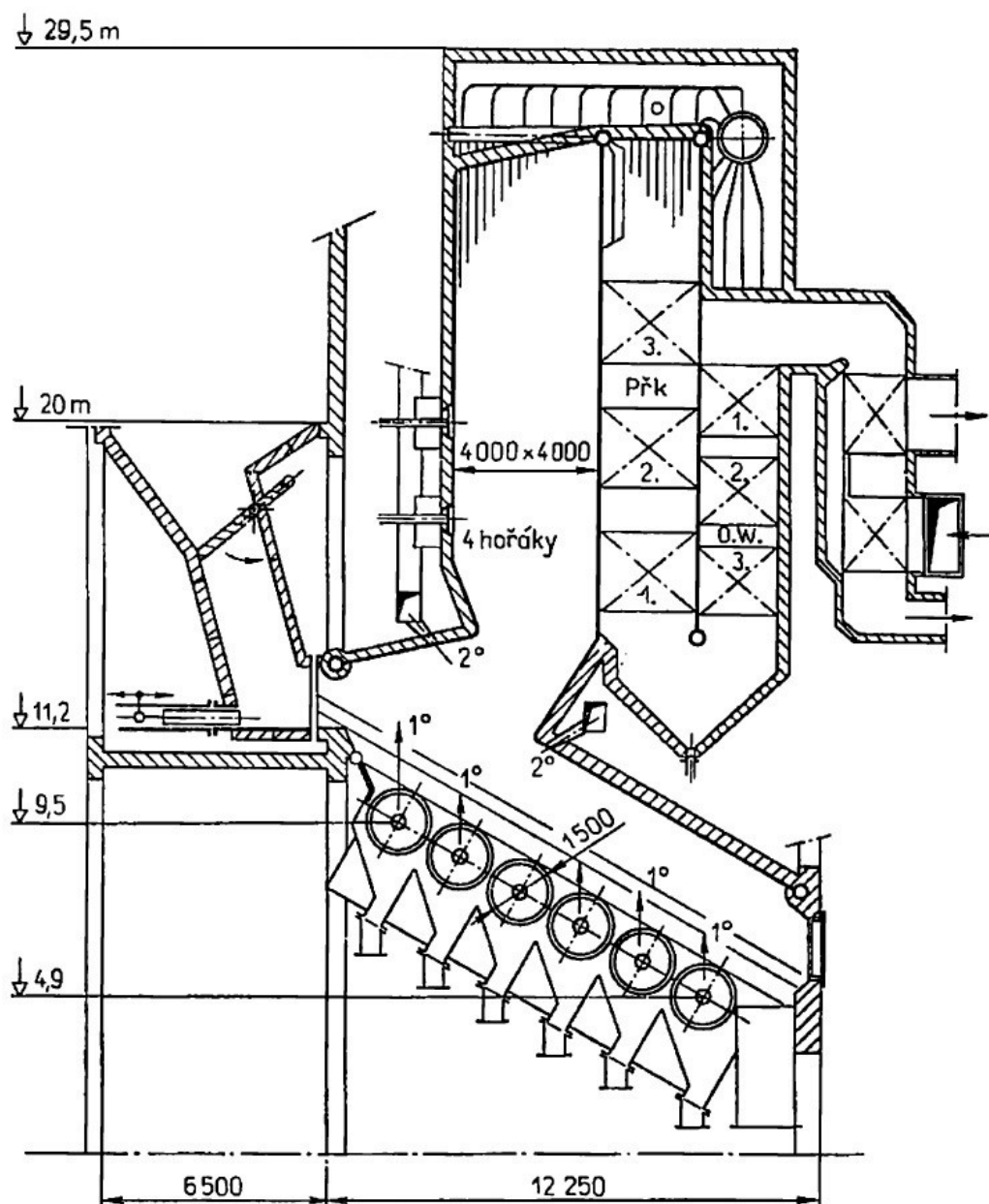
Pro dosažení lepšího promíchání paliva se používají rošty prohrabovací, neboli rošty vratisuvné, Obr. 2. 13, které jsou konstruovány podobně jako rošty přesuvné jen s tím rozdílem, že se jednotlivé stupně pohybují proti směru pohybu paliva a tím dochází k lepšímu promíchání vrstvy paliva.



Obr. 2. 13 Vratisuvný rošt [4]



Pro spalování městských odpadů ve spalovnách se v některých případech používá tzv. válcový rošt, Obr. 2. 14. Rošt jde zde tvořen z šikmé plochy, na které se otáčejí duté válce, které dopravují palivo až na dohořivací roštnici, odkud putuje škvára do výsypky. Spalovací vzduch se přivádí dutými čepy do válců a z nich otvory dále do vrstvy, přičemž každý válec má samostatnou regulaci vzduchu. Všechny válce mají stejné otáčky.



Obr. 2. 14 Válcový rošt pro spalování městských odpadů [1]



### 3 ZADANÉ PARAMETRY

#### 3.1 Cíl práce

Cílem této diplomové práce bylo přepočítat spalovací komoru na nové palivo a stanovit nové parametry spalovací komory a spalin při spalování tohoto paliva. Nejedná se tedy o návrh kotle, ale o přepočet kotle.

#### 3.2 Parametry pro výpočet

<i>Parametr</i>	<i>Značení</i>	<i>Palivo 1</i>	<i>Palivo 2</i>
<i>Výhřevnost paliva</i>	$Q_i^r$	11500 kJ · kg <sup>-1</sup>	12500 kJ · kg <sup>-1</sup>
<i>Obsah vody</i>	$W^r$	26 %	25 %
<i>Obsah popelovin</i>	$A^r$	30 %	27,5 %
<i>Obsah uhlíku</i>	$C^r$	30,7 %	33,2 %
<i>Obsah vodíku</i>	$H^r$	2,6 %	2,6 %
<i>Obsah dusíku</i>	$N^r$	0,5 %	0,6 %
<i>Obsah síry</i>	$S^r$	0,7 %	0,8 %
<i>Obsah kyslíku</i>	$O^r$	9,5 %	8,9 %

Tab. 3. 1 Prvkové složení a výhřevnost paliv

<i>Parametr</i>	<i>Značení</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
<i>Poměrný úlet popíku z ohniště</i>	$a_{\dot{u}}$	35	%
<i>Množství páry</i>	$m_{pp}$	50	t · h <sup>-1</sup>
<i>Množství odluhu</i>	$m_{odl}$	4	%
<i>Tlak páry</i>	$p_{pp}$	12	MPa
<i>Teplota páry</i>	$t_{pp}$	505	°C
<i>Teplota napájecí vody</i>	$t_{NV}$	115	°C
<i>Teplota spalin za kotlem</i>	$t_{sp}$	150	°C
<i>Vztažná teplota</i>	$t_{vz}$	20	°C
<i>Relativní vlhkost vzduchu</i>	$\varphi$	60	%
<i>Přebytek vzduchu ve spalovací komoře</i>	$\alpha$ ( $\alpha_{ok}$ )	40	%
<i>Přebytek vzduchu za kotlem</i>	$\alpha_k$	60	%
<i>Obsah spalitelných látek v popílku</i>	$C_{pop}$	15	%
<i>Množství popela odváděného jako struska</i>	$X_{str}$	65	%
<i>Množství popela odváděného jako popílek</i>	$X_{pop}$	35	%

Tab. 3. 2 Zadané parametry

## 4 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY PRO PALIVO 1

Stechiometrické výpočty nám slouží ke zjištění objemu vzduchu, který potřebujeme pro spálení jednotkového množství paliva a objemu spalin, které při spalování vznikají, jedná se tedy o výpočty objemové. Vypočtené objemy médií se vyjadřují v  $m_N^3$  (normálních metrech krychlových při teplotě  $T_n = 273\text{ K}$  a tlaku  $p_n = 101,325\text{ kPa}$ ) na  $1\text{ kg}$  spáleného paliva. Použité vzorce jsou odvozeny za předpokladu dokonalého spalování.

### Minimální množství kyslíku ke spálení $1\text{ kg}$ paliva

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.1)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{30,7}{12,01} + \frac{2,6}{4,032} + \frac{0,7}{32,06} - \frac{9,5}{32} \right) = 0,6551 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde	$C^r$	[%]	je obsah uhlíku v surovém vzorku paliva
	$H^r$	[%]	je obsah vodíku v surovém vzorku paliva
	$O^r$	[%]	je obsah kyslíku v surovém vzorku paliva
	$S^r$	[%]	je obsah síry v surovém vzorku paliva

### Minimální množství suchého vzduchu ke spálení $1\text{ kg}$ paliva

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{21} \cdot 100 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.2)$$

$$O_{VS \min} = \frac{0,6551}{21} \cdot 100 = 3,1197 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde	$O_{O_2 \min}$	$[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$	je minimální množství kyslíku potřebného ke spálení
$1\text{ kg}$			paliva

### Podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu vyjadřuje součinitel

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [1] \quad (4.3)$$

$$\chi_v = 1 + \frac{60}{100} \cdot \frac{0,0023368}{0,1013 - \frac{60}{100} \cdot 0,0023368} = 1,0140$$

kde  $\varphi$  [%] je relativní vlhkost vzduchu  
 $p_c$  [MPa] je celkový tlak  
 $p''$  [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu, voleno dle literatury [1]

### Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$O_{VVmin} = \chi_v \cdot O_{VSmin} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.4)$$
$$O_{VVmin} = 1,0140 \cdot 3,1197 = 3,1635 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $\chi_v$  [1] je podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu  
 $O_{VSmin}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

$$O_{H_2O}^V = O_{VVmin} - O_{VSmin} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VSmin} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.5)$$
$$O_{H_2O}^V = 3,1635 - 3,1197 = (1,014 - 1) \cdot 3,1197 = 0,0438 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{VVmin}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální objem vlhkého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva  
 $O_{VSmin}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva  
 $\chi_v$  [1] je podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu

### Objemy jednotlivých složek ve spalínách

$$\text{CO}_2: \quad O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + 0,0003 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (4.6)$$

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{30,7}{100} + 0,0003 \cdot 3,1197 = 0,5699 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $C^r$  [%] je obsah uhlíku v surovém vzorku paliva  
 $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

$$\text{SO}_2: \quad O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (4.7)$$

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,7}{100} = 0,0048 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $S^r$  [%] je obsah síry v surovém vzorku paliva

$$\text{N}_2: \quad O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,7805 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (4.8)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,5}{100} + 0,7805 \cdot 3,1197 = 2,4389 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $N^r$  [%] je obsah dusíku v surovém vzorku paliva  
 $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

$$\text{Ar:} \quad O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (4.9)$$

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot 3,1197 = 0,0287 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Minimální objem suchých spalin

Minimální objem suchých spalin vznikne při dokonalém spálení 1kg paliva s minimálním množstvím vzduchu  $O_{VS \min}$  tj. při přebytku  $\alpha=1$ .

$$O_{SS \min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.10)$$

$$O_{SS \min} = 0,5699 + 0,0048 + 2,4389 + 0,0287 = 3,0423 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{CO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalinách

$O_{SO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu siřičitého ve spalinách

$O_{N_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem dusíku ve spalinách

$O_{Ar} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem argonu ve spalinách

### Maximální množství CO<sub>2</sub> ve spalinách

$$(CO_2)_{\max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS \min}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (4.11)$$

$$(CO_2)_{\max} = \frac{0,5699}{3,0423} \cdot 100 = 18,7339 \%$$

kde  $O_{CO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalinách

$O_{SS \min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem suchých spalin

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{W^r}{100} + O_{H_2O}^V \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.12)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{2,6}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{26}{100} + 0,0438 = 0,6559 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $H^r [\%]$  je obsah vodíku v surovém vzorku paliva

$W^r [\%]$  je obsah vody v surovém vzorku paliva

$O_{H_2O}^V [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

## Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SV\min} = O_{SS\min} + O_{H_2O}^S \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.13)$$

$$O_{SV\min} = 3,0423 + 0,6559 = 3,6983 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{SS\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem suchých spalin  
 $O_{H_2O}^S [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

## 4.1 Přibližná metoda určení spotřeby vzduchu a vzniklých spalin

Pomocí vztahů podle Rosina – Freslinga, které jsou uvedené níže, je možné rychle určit přibližné množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin:

$$O_{VS\min} = K_1 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,7} + K_4 = 1,012 \cdot \frac{11500}{4186,7} + 0,5 = 3,2798 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}], [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (4.14)$$

$$O_{SV\min} = K_3 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,7} + K_4 = 0,95 \cdot \frac{11500}{4186,7} + 1,375 = 3,9845 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}], [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (4.15)$$

$Q_i^r$  představuje výhřevnost paliva  $[kJ \cdot kg^{-1}]$ ;  $[kJ \cdot m_N^{-3}]$ , konstanty  $K_1$  až  $K_4$  jsou uvedeny v následující tabulce:

Paliva	$K_1$ $[m_N^3 \cdot kJ^{-1}]$	$K_2$ $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$ $[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$	$K_3$ $[m_N^3 \cdot kJ^{-1}]$	$K_4$ $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$ $[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
tuhá	1,012	0,5	0,95	1,375
kapalná	0,85	2,0	1,11	0
plynná $Q_i^r < 12,6 [MJ \cdot m_N^{-3}]$	0,92	-0,08	0,76	0,87
plynná $Q_i^r > 12,6 [MJ \cdot m_N^{-3}]$	1,07	0	1,09	0,47

Tab. 4. 1 Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce [1]

Závěrem lze říci, že pro přibližný výpočet minimálního množství spalin a vzduchu lze místo zdoluhavého výpočtu celé stechiometrie použít Rosinovy – Freslingovy vzorce, u kterých jsou odchylky minimální.

## 4.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalín

Přebytek vzduchu je důležitou veličinou pro správný provoz kotle. Vysoký součinitel přebytku vzduchu zhoršuje komínovou ztrátu a snižuje účinnost kotle. Nízký součinitel přebytku vzduchu může vést k místnímu nedokonalému spalování, což zvyšuje ztráty chemickým nedopalem a snižuje teplo uvolněné v ohništi. Na základě konzultací volím přebytek vzduchu na roštu  $\alpha = 1,4$  a za kotlem  $\alpha_k = 1,6$ .

### Skutečné množství spalín (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{SV} = O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.16)$$
$$O_{SV} = 3,6983 + (1,4 - 1) \cdot 3,1635 = 4,9637 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{SV\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem vlhkých spalín  
 $O_{VV\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem vlhkého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Skutečné množství vodní páry (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.17)$$
$$O_{H_2O} = 0,6559 + (1,0140 - 1) \cdot (1,4 - 1) \cdot 3,1197 = 0,6735 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{H_2O}^S [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalín  
 $\chi_v [1]$  je podíl vodní páry na 1  $m_N^3$  suchého vzduchu  
 $\alpha [1]$  je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VS\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{VV} = \alpha \cdot O_{VV\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (4.18)$$
$$O_{VV} = 1,4 \cdot 3,1635 = 4,4289 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $\alpha [1]$  je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VS\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální množství vlhkého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Objemový podíl jednotlivých složek ve vlhkých spalínách

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,5699}{4,9637} \cdot 100 = 11,5\% \quad (4.19)$$

kde  $O_{\text{CO}_2} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalin

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,0048}{4,9637} \cdot 100 = 0,1\% \quad (4.20)$$

kde  $O_{\text{SO}_2} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem oxidu siřičitého ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalin

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{0,7805 \cdot O_{\text{VS}} + O_{\text{N}_2 \text{ palivo}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,7805 \cdot 4,3675 + \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,5}{100}}{4,9637} \cdot 100 = 68,8\% \quad (4.21)$$

kde  $O_{\text{N}_2 \text{ palivo}} [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem dusíku v palivu  
 $O_{\text{VS}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalovacího vzduchu  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalin

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,6735}{4,9637} \cdot 100 = 13,6\% \quad (4.22)$$

kde  $O_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství vodní páry  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalin

$$\omega_{\text{Ar}} = \frac{O_{\text{Ar}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,0287}{4,9637} \cdot 100 = 0,6\% \quad (4.23)$$

kde  $O_{\text{Ar}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem argonu ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalin



$$\omega_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (1,4 - 1) \cdot 3,1197}{4,9637} \cdot 100 = 5,3\% \quad (4.24)$$

kde  $\alpha$  [1] je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VSmin}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva  
 $O_{SV}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je skutečné množství spalin

### 4.3 Entalpie vzduchu a spalin

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva pro hodnoty ( $t = 150$  °C;  $\alpha_k = 1,60$ ;  $f = 1,0140$ ).

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (4.25)$$

$$I_S^{t,\alpha} = 792,9704 + (1,60 - 1) \cdot 631,5669 = 1171,9105 kJ \cdot kg^{-1}$$

kde  $I_{Smin}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie minimálního množství spalin  
 $\alpha_k$  [1] je přebytek vzduchu za kotlem  
 $I_{Vmin}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie minimálního množství vzduchu

### Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O}^S \cdot i_{H_2O}^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (4.26)$$

$$I_{Smin}^t = 0,5699 \cdot 263,75 + 0,0048 \cdot 292,65 + 2,4389 \cdot 194,7 + 0,0287 \cdot 139,535 + 0,6559 \cdot 227,55$$

$$+ 0,35 \cdot 0,30 \cdot 125,2$$

$$I_{Smin}^t = 792,9704 kJ \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{CO_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem oxidu uhličitého ve spalinách  
 $O_{SO_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem oxidu siřičitého ve spalinách  
 $O_{N_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem dusíku ve spalinách  
 $O_{Ar}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem argonu ve spalinách  
 $O_{H_2O}^S$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin  
 $i_{CO_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie CO<sub>2</sub> při teplotě 150°C  
 $i_{SO_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie SO<sub>2</sub> při teplotě 150°C  
 $i_{N_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie N<sub>2</sub> při teplotě 150°C  
 $i_{Ar}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie Ar při teplotě 150°C

$i_{\text{H}_2\text{O}}^t$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie $\text{H}_2\text{O}$ při teplotě $150^\circ\text{C}$
$a_{\text{ú}}$	[1]	je poměrný úlet popílku z ohniště
$A^r$	[1]	je obsah popelovin v palivu
$i_{\text{pop}}^t$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie popílku při teplotě $150^\circ\text{C}$

### Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{V\min}^t = O_{VS\min} \cdot i_{VS}^t + O_{\text{H}_2\text{O}}^V \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}^t \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (4.27)$$

$$I_{V\min}^t = 3,1197 \cdot 199,25 + 0,0438 \cdot 227,55 = 631,5669 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $O_{VS\min}$   $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva

$i_{VS}^t$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je entalpie suchého vzduchu při teplotě  $150^\circ\text{C}$

$O_{\text{H}_2\text{O}}^V$   $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

$i_{\text{H}_2\text{O}}^t$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je entalpie vody při teplotě  $150^\circ\text{C}$

Pro další výpočty entalpií při jiných teplotách, bereme hodnoty složek spalín z tabulky Tab. 4. 2.

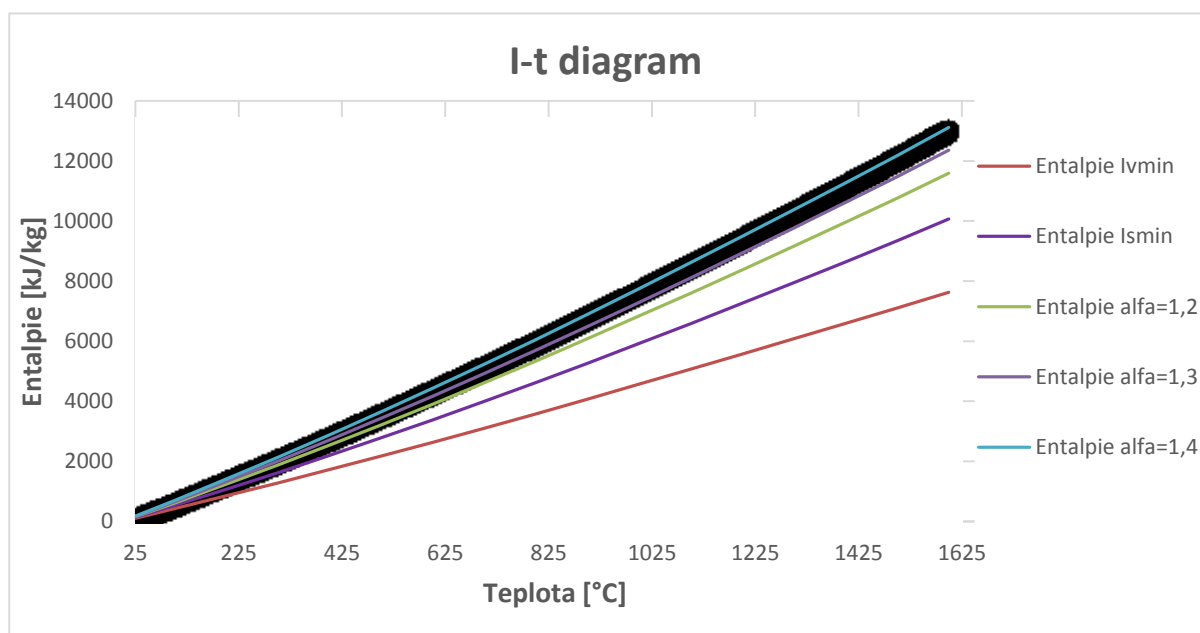
Teplota	Entalpie složek spalín [kJ/kg]								
t [ $^\circ\text{C}$ ]	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{N}_2$	Ar	$\text{H}_2\text{O}$	Vzduch suchý	CO	$\text{O}_2$	popílek [kJ/kg]
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,10	32,57	32,49	32,78	20,20
100	170,0	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061

Tab. 4. 2 Entalpie složek spalín

Vypočtené hodnoty jednotlivých entalpií při různých teplotách jsou uvedeny v tabulce Tab. 4. 3. Z vypočtených hodnot entalpií, které jsou uvedeny v Tab. 4. 3, je sestrojen I-t diagram vzduchu a spalin, na kterém můžeme vidět, jak se mění velikost entalpie spalin, při daném přebytku vzduchu, v závislosti na teplotě.

t [°C]	$l_{vmin}$ [kJ/kg]	$l_{smin}$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,2)$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,3)$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,4)$ [kJ/kg]
25	103,32	131,72	152,38	162,71	173,05
100	419,33	523,53	607,40	649,33	691,26
200	843,80	1062,41	1231,17	1315,55	1399,93
300	1275,95	1617,02	1872,21	1999,80	2127,40
400	1717,36	2187,65	2531,12	2702,86	2874,60
500	2168,99	2773,97	3207,77	3424,67	3641,57
600	2630,54	3376,04	3902,15	4165,20	4428,26
700	3101,70	3992,43	4612,78	4922,95	5233,12
800	3580,61	4622,88	5339,00	5697,06	6055,13
900	4069,41	5265,04	6078,92	6485,86	6892,80
1000	4564,72	5921,45	6834,39	7290,86	7747,33
1100	5066,48	6586,68	7599,97	8106,62	8613,27
1200	5571,57	7263,11	8377,42	8934,58	9491,74
1300	6080,01	7947,61	9163,61	9771,61	10379,61
1400	6591,70	8639,38	9957,72	10616,89	11276,06
1500	7109,85	9338,51	10760,48	11471,46	12182,45
1600	7628,13	10067,49	11593,12	12355,93	13118,75

Tab. 4. 3 Entalpie spalin



Obr. 4. 1 Diagram spalin

## 5 STECHIOMETRICKÉ VÝPOČTY PRO PALIVO 2

Stechiometrické výpočty nám slouží ke zjištění objemu vzduchu, který potřebujeme pro spálení jednotkového množství paliva a objemu spalin, které při spalování vznikají, jedná se tedy o výpočty objemové. Vypočtené objemy médií se vyjadřují v  $\text{m}_N^3$  (normálních metrech krychlových při teplotě  $T_n = 273\text{K}$  a tlaku  $p_n = 101,325\text{kPa}$ ) na  $1\text{kg}$  spáleného paliva. Použité vzorce jsou odvozeny za předpokladu dokonalého spalování.

### Minimální množství kyslíku ke spálení $1\text{kg}$ paliva

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{C^r}{12,01} + \frac{H^r}{4,032} + \frac{S^r}{32,06} - \frac{O^r}{32} \right) \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.1)$$

$$O_{O_2 \min} = \frac{22,39}{100} \cdot \left( \frac{33,2}{12,01} + \frac{2,6}{4,032} + \frac{0,8}{32,06} - \frac{8,9}{32} \right) = 0,7066 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde	$C^r$	[%]	je obsah uhlíku v surovém vzorku paliva
	$H^r$	[%]	je obsah vodíku v surovém vzorku paliva
	$O^r$	[%]	je obsah kyslíku v surovém vzorku paliva
	$S^r$	[%]	je obsah síry v surovém vzorku paliva

### Minimální množství suchého vzduchu ke spálení $1\text{kg}$ paliva

$$O_{VS \min} = \frac{O_{O_2 \min}}{21} \cdot 100 \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.2)$$

$$O_{VS \min} = \frac{0,7066}{21} \cdot 100 = 3,3649 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $O_{O_2 \min} [\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je minimální množství kyslíku potřebného ke spálení  $1\text{kg}$  paliva

### Podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu vyjadřuje součinitel

$$\chi_v = 1 + \frac{\varphi}{100} \cdot \frac{p''}{p_c - \frac{\varphi}{100} \cdot p''} \quad [1] \quad (5.3)$$

$$\chi_v = 1 + \frac{60}{100} \cdot \frac{0,0023368}{0,1013 - \frac{60}{100} \cdot 0,0023368} = 1,0140$$

kde  $\varphi$  [%] je relativní vlhkost vzduchu  
 $p_c$  [MPa] je celkový tlak  
 $p''$  [MPa] je parciální tlak vodní páry na mezi sytosti při dané teplotě vzduchu, voleno dle literatury [1]

### Minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva

$$O_{VV\min} = \chi_v \cdot O_{VS\min} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (5.4)$$
$$O_{VV\min} = 1,0140 \cdot 3,3649 = 3,4122 m^3_N \cdot kg^{-1}$$

kde  $\chi_v$  [1] je podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu  
 $O_{VS\min}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

$$O_{H_2O}^V = O_{VV\min} - O_{VS\min} = (\chi_v - 1) \cdot O_{VS\min} \quad [m^3_N \cdot kg^{-1}] \quad (5.5)$$
$$O_{H_2O}^V = 3,4122 - 3,3649 = (1,0140 - 1) \cdot 3,3649 = 0,0472 m^3_N \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{VV\min}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální objem vlhkého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva  
 $O_{VS\min}$  [m<sup>3</sup><sub>N</sub> · kg<sup>-1</sup>] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva  
 $\chi_v$  [1] je podíl vodní páry na 1 m<sup>3</sup><sub>N</sub> suchého vzduchu

### Objemy jednotlivých složek ve spalínách

$$\text{CO}_2: \quad O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{C^r}{100} + 0,0003 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.6)$$

$$O_{\text{CO}_2} = \frac{22,26}{12,01} \cdot \frac{33,2}{100} + 0,0003 \cdot 3,3649 = 0,6164 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $C^r$  [%] je obsah uhlíku v surovém vzorku paliva  
 $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

$$\text{SO}_2: \quad O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{S^r}{100} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.7)$$

$$O_{\text{SO}_2} = \frac{21,89}{32,06} \cdot \frac{0,8}{100} = 0,0055 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $S^r$  [%] je obsah síry v surovém vzorku paliva

$$\text{N}_2: \quad O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{N^r}{100} + 0,7805 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.8)$$

$$O_{\text{N}_2} = \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,6}{100} + 0,7805 \cdot 3,3649 = 2,6311 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $N^r$  [%] je obsah dusíku v surovém vzorku paliva  
 $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

$$\text{Ar:} \quad O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot O_{\text{VS min}} \quad \left[ \text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1} \right] \quad (5.9)$$

$$O_{\text{Ar}} = 0,0092 \cdot 3,3646 = 0,0310 \text{ m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $O_{\text{VS min}}$  [ $\text{m}_N^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Minimální objem suchých spalin

Minimální objem suchých spalin vznikne při dokonalém spálení 1kg paliva s minimálním množstvím vzduchu  $O_{VS \min}$  tj. při přebytku  $\alpha=1$ .

$$O_{SS \min} = O_{CO_2} + O_{SO_2} + O_{N_2} + O_{Ar} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.10)$$

$$O_{SS \min} = 0,6164 + 0,0055 + 2,6311 + 0,0310 = 3,2839 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{CO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalinách

$O_{SO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu siřičitého ve spalinách

$O_{N_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem dusíku ve spalinách

$O_{Ar} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem argonu ve spalinách

### Maximální množství CO<sub>2</sub> ve spalinách

$$(CO_2)_{\max} = \frac{O_{CO_2}}{O_{SS \min}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.11)$$

$$(CO_2)_{\max} = \frac{0,6164}{3,2839} \cdot 100 = 18,7690 \%$$

kde  $O_{CO_2} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalinách

$O_{SS \min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem suchých spalin

### Objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{H^r}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{W^r}{100} + O_{H_2O}^V \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.12)$$

$$O_{H_2O}^S = \frac{44,8}{4,032} \cdot \frac{2,6}{100} + \frac{22,4}{18,016} \cdot \frac{25}{100} + 0,0472 = 0,6470 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $H^r [\%]$  je obsah vodíku v surovém vzorku paliva

$W^r [\%]$  je obsah vody v surovém vzorku paliva

$O_{H_2O}^V [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

## Minimální objem vlhkých spalin

$$O_{SV\min} = O_{SS\min} + O_{H_2O}^S \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.13)$$

$$O_{SV\min} = 3,2839 + 0,6470 = 3,9309 \, m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{SS\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem suchých spalin  
 $O_{H_2O}^S [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin

## 5.1 Přibližná metoda určení spotřeby vzduchu a vzniklých spalin

Pomocí vztahů podle Rosina – Freslinga, které jsou uvedené níže, je možné rychle určit přibližné množství spalovacího vzduchu a vzniklých spalin:

$$O_{VS\min} = K_1 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,7} + K_4 = 1,012 \cdot \frac{12500}{4186,7} + 0,5 = 3,5215 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}], [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (5.14)$$

$$O_{SV\min} = K_3 \cdot \frac{Q_i^r}{4186,7} + K_4 = 0,95 \cdot \frac{11500}{4186,7} + 1,375 = 4,2114 \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}], [m_N^3 \cdot m_N^{-3}] \quad (5.15)$$

$Q_i^r$  představuje výhřevnost paliva  $[kJ \cdot kg^{-1}]$ ;  $[kJ \cdot m_N^{-3}]$ , konstanty  $K_1$  až  $K_4$  jsou uvedeny v následující tabulce:

Paliva	$K_1$ $[m_N^3 \cdot kJ^{-1}]$	$K_2$ $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$ $[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$	$K_3$ $[m_N^3 \cdot kJ^{-1}]$	$K_4$ $[m_N^3 \cdot kg^{-1}]$ $[m_N^3 \cdot m_N^{-3}]$
tuhá	1,012	0,5	0,95	1,375
kapalná	0,85	2,0	1,11	0
plynná $Q_i^r < 12,6 [MJ \cdot m_N^{-3}]$	0,92	-0,08	0,76	0,87
plynná $Q_i^r > 12,6 [MJ \cdot m_N^{-3}]$	1,07	0	1,09	0,47

Tab. 5. 1 Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce [1]

Závěrem lze říci, že pro přibližný výpočet minimálního množství spalin a vzduchu lze místo zdoluhavého výpočtu celé stechiometrie použít Rosinovy – Freslingovy vzorce, u kterých jsou odchylky minimální.



## 5.2 Součinitel přebytku vzduchu a objemy vzduchu a spalín

Přebytek vzduchu je důležitou veličinou pro správný provoz kotle. Vysoký součinitel přebytku vzduchu zhoršuje komínovou ztrátu a snižuje účinnost. Nízký součinitel přebytku vzduchu může vést k místnímu nedokonalému spalování, což zvyšuje ztráty chemickým nedopalem a snižuje teplo uvolněné v ohništi. Na základě konzultací volím přebytek vzduchu na roštu  $\alpha = 1,4$  a za kotlem  $\alpha_k = 1,6$ .

### Skutečné množství spalín (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{SV} = O_{SV\min} + (\alpha - 1) \cdot O_{VV\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.16)$$

$$O_{SV} = 3,9309 + (1,4 - 1) \cdot 3,4122 = 5,2957 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{SV\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem vlhkých spalín  
 $O_{VV\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální objem vlhkého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Skutečné množství vodní páry (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{H_2O} = O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VS\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.17)$$

$$O_{H_2O} = 0,6470 + (1,0140 - 1) \cdot (1,4 - 1) \cdot 3,3649 = 0,6658 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{H_2O}^S [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalín  
 $\chi_v [1]$  je podíl vodní páry na 1  $m_N^3$  suchého vzduchu  
 $\alpha [1]$  je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VS\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu (s přebytkem vzduchu $\alpha = 1,40$ )

$$O_{VV} = \alpha \cdot O_{VV\min} \quad [m_N^3 \cdot kg^{-1}] \quad (5.18)$$

$$O_{VV} = 1,4 \cdot 3,4122 = 4,7771 m_N^3 \cdot kg^{-1}$$

kde  $\alpha [1]$  je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VV\min} [m_N^3 \cdot kg^{-1}]$  je minimální množství vlhkého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva

### Objemový podíl jednotlivých složek ve vlhkých spalínách

$$\omega_{\text{CO}_2} = \frac{O_{\text{CO}_2}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,6164}{5,2957} \cdot 100 = 11,6\% \quad (5.19)$$

kde  $O_{\text{CO}_2} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem oxidu uhličitého ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalín

$$\omega_{\text{SO}_2} = \frac{O_{\text{SO}_2}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,0055}{5,2957} \cdot 100 = 0,10\% \quad (5.20)$$

kde  $O_{\text{SO}_2} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem oxidu siřičitého ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalín

$$\omega_{\text{N}_2} = \frac{0,7805 \cdot O_{\text{VS}} + O_{\text{N}_2 \text{ palivo}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,7805 \cdot 4,7109 + \frac{22,4}{28,016} \cdot \frac{0,6}{100}}{5,2957} \cdot 100 = 69,5\% \quad (5.21)$$

kde  $O_{\text{N}_2 \text{ palivo}} [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem dusíku v palivu  
 $O_{\text{VS}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalovacího vzduchu  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalín

$$\omega_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{O_{\text{H}_2\text{O}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,6656}{5,2957} \cdot 100 = 12,6\% \quad (5.22)$$

kde  $O_{\text{H}_2\text{O}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství vodní páry  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalín

$$\omega_{\text{Ar}} = \frac{O_{\text{Ar}}}{O_{\text{SV}}} \cdot 100 = \frac{0,0310}{5,2957} \cdot 100 = 0,6\% \quad (5.23)$$

kde  $O_{\text{Ar}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem argonu ve spalínách  
 $O_{\text{SV}} \quad [\text{m}_\text{N}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je skutečné množství spalín

$$\omega_{O_2} = \frac{0,21 \cdot (\alpha - 1) \cdot O_{VSmin}}{O_{SV}} \cdot 100 = \frac{0,21 \cdot (1,4 - 1) \cdot 3,3649}{5,2957} \cdot 100 = 5,4\% \quad (5.24)$$

kde  $\alpha$  [1] je přebytek vzduchu ve spalovací komoře  
 $O_{VSmin}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke  
spálení 1kg paliva  
 $O_{SV}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je skutečné množství spalin

### 5.3 Entalpie vzduchu a spalin

Entalpie spalin vzniklých spálením 1 kg paliva pro hodnoty ( $t = 150\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $\alpha_k = 1,60$ ;  $f = 1,0140$ ).

$$I_S^{t,\alpha} = I_{Smin}^t + (\alpha - 1) \cdot I_{Vmin}^t \quad [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (5.25)$$

$$I_S^{t,\alpha} = 840,0612 + (1,60 - 1) \cdot 681,1967 = 1248,7792 \text{ kJ} \cdot kg^{-1}$$

kde  $I_{Smin}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie minimálního množství spalin  
 $\alpha_k$  [1] je přebytek vzduchu za kotlem  
 $I_{Vmin}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie minimálního množství vzduchu

### Entalpie minimálního množství spalin

$$I_{Smin}^t = O_{CO_2} \cdot i_{CO_2}^t + O_{SO_2} \cdot i_{SO_2}^t + O_{N_2} \cdot i_{N_2}^t + O_{Ar} \cdot i_{Ar}^t + O_{H_2O}^S \cdot i_{H_2O}^t + a_u \cdot A^r \cdot i_{pop}^t [kJ \cdot kg^{-1}] \quad (5.26)$$

$$I_{Smin}^t = 0,6164 \cdot 263,75 + 0,0055 \cdot 292,65 + 2,6311 \cdot 194,7 + 0,0310 \cdot 139,535 + 0,6470 \cdot 227,55$$

$$+ 0,35 \cdot 0,275 \cdot 125,2$$

$$I_{Smin}^t = 840,0612 \text{ kJ} \cdot kg^{-1}$$

kde  $O_{CO_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem oxidu uhličitého ve spalinách  
 $O_{SO_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem oxidu siřičitého ve spalinách  
 $O_{N_2}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem dusíku ve spalinách  
 $O_{Ar}$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem argonu ve spalinách  
 $O_{H_2O}^S$  [ $m_N^3 \cdot kg^{-1}$ ] je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin  
 $i_{CO_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie  $CO_2$  při teplotě  $150^\circ\text{C}$   
 $i_{SO_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie  $SO_2$  při teplotě  $150^\circ\text{C}$   
 $i_{N_2}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie  $N_2$  při teplotě  $150^\circ\text{C}$   
 $i_{Ar}^t$  [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ] je entalpie  $Ar$  při teplotě  $150^\circ\text{C}$

$i_{\text{H}_2\text{O}}^t$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie $\text{H}_2\text{O}$ při teplotě $150^\circ\text{C}$
$a_{\text{ú}}$	[1]	je poměrný úlet popílku z ohniště
$A^r$	[%]	je obsah popelovin v palivu
$i_{\text{pop}}^t$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie popílku při teplotě $150^\circ\text{C}$

### Entalpie minimálního množství vzduchu

$$I_{\text{Vmin}}^t = O_{\text{VSmin}} \cdot i_{\text{VS}}^t + O_{\text{H}_2\text{O}}^v \cdot i_{\text{H}_2\text{O}}^t \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (5.27)$$

$$I_{\text{Vmin}}^t = 3,3649 \cdot 199,25 + 0,0472 \cdot 227,55 = 681,1967 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde  $O_{\text{VSmin}}$   $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je minimální množství suchého vzduchu potřebného ke spálení 1kg paliva

$i_{\text{VS}}^t$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je entalpie suchého vzduchu při teplotě  $150^\circ\text{C}$

$O_{\text{H}_2\text{O}}^v$   $[\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}]$  je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkého vzduchu

$i_{\text{H}_2\text{O}}^t$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je entalpie vody při teplotě  $150^\circ\text{C}$

Pro další výpočty entalpií při jiných teplotách, bereme hodnoty složek spalín z tabulky Tab. 5. 2.

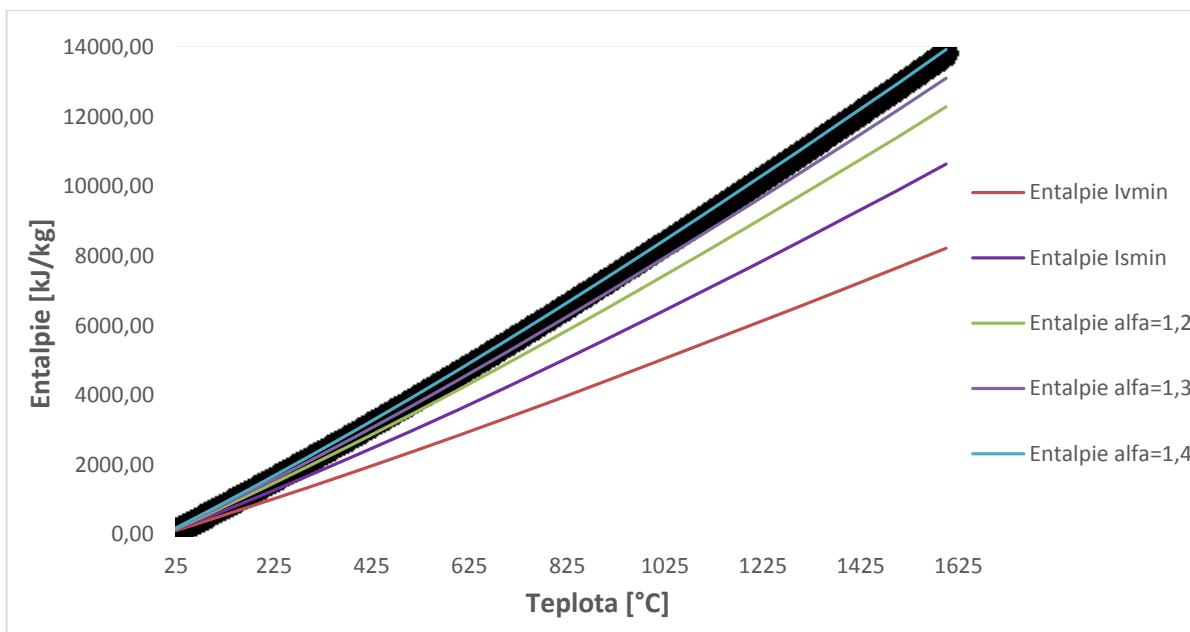
Teplota	Entalpie složek spalín [kJ/kg]								
t [ $^\circ\text{C}$ ]	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{N}_2$	Ar	$\text{H}_2\text{O}$	Vzduch suchý	CO	$\text{O}_2$	popílek [kJ/kg]
25	41,62	46,81	32,53	23,32	39,10	32,57	32,49	32,78	20,20
100	170,0	191,2	129,5	93,07	150,6	132,3	132,3	131,7	80,4
200	357,5	394,1	259,9	186,0	304,5	266,2	261,4	267,0	170,0
300	558,8	610,4	392,1	278,8	462,8	402,5	395	406,8	264,6
400	771,9	836,5	526,7	371,7	625,9	541,7	531,7	550,9	361,6
500	994,4	1070	664	464,7	794,5	684,1	671,6	698,7	459,5
600	1225	1310	804,3	557,3	968,8	829,6	814,3	849,9	558,0
700	1462	1554	947,3	650,2	1149	978,1	960,4	1003	658,3
800	1705	1801	1093	743,1	1335	1129	1109	1159	760,8
900	1952	2052	1241	835,7	1526	1283	1260	1318	868,4
1000	2203	2304	1392	928,2	1723	1439	1413	1477	982,8
1100	2458	2540	1544	1020	1925	1597	1567	1638	1106
1200	2716	2803	1698	1114	2132	1756	1723	1802	1240
1300	2976	3063	1853	1207	2344	1916	1881	1965	1386
1400	3239	3323	2009	1300	2559	2077	2040	2129	1543
1500	3503	3587	2166	1393	2779	2240	2199	2293	1710
1600	3769	3838	2325	1577	3002	2403	2359	2465	2061

Tab. 5. 2 Entalpie složek spalín

Vypočtené hodnoty jednotlivých entalpií při různých teplotách jsou uvedeny v tabulce Tab. 5. 3. Z vypočtených hodnot entalpií, které jsou uvedeny v Tab. 5. 3, je sestrojen I-t diagram vzduchu a spalin, na kterém můžeme vidět, jak se mění velikost entalpie spalin, při daném přebytku vzduchu, v závislosti na teplotě.

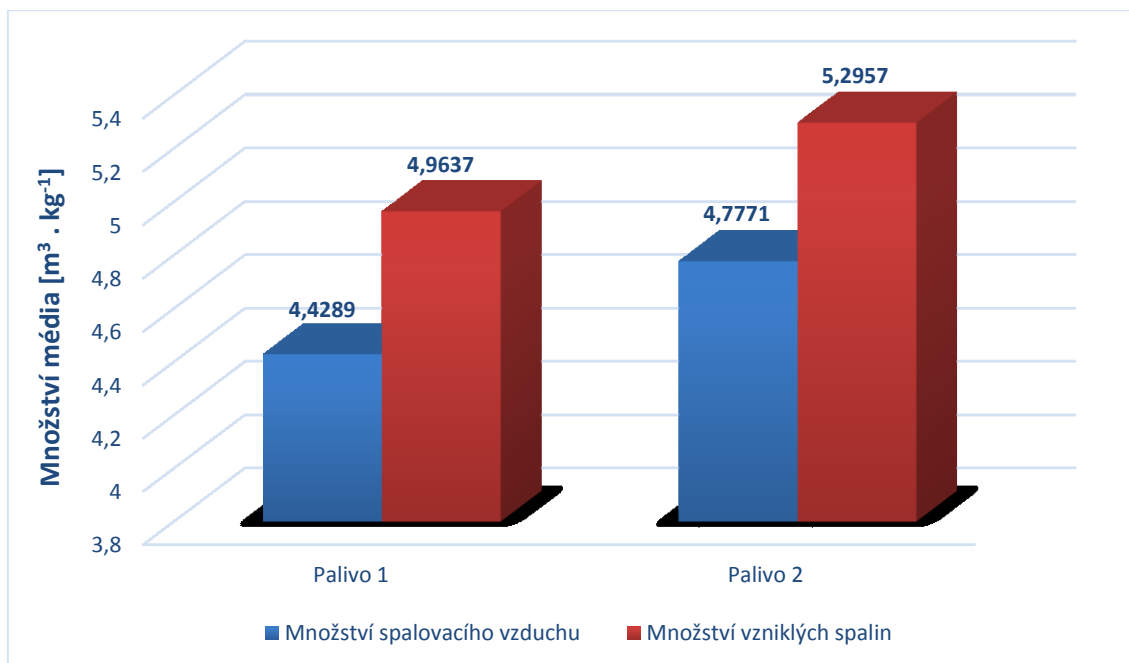
t [°C]	$l_{vmin}$ [kJ/kg]	$l_{smin}$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,2)$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,3)$ [kJ/kg]	$l_s (\alpha=1,4)$ [kJ/kg]
25	111,44	139,47	161,75	172,90	184,04
100	452,28	554,63	645,09	690,31	735,54
200	910,11	1125,49	1307,52	1398,53	1489,54
300	1376,22	1713,00	1988,24	2125,86	2263,48
400	1852,31	2317,48	2687,95	2873,18	3058,41
500	2339,43	2938,56	3406,44	3640,39	3874,33
600	2837,25	3576,29	4143,74	4427,46	4711,19
700	3345,44	4229,09	4898,17	5232,72	5567,26
800	3861,98	4896,67	5669,06	6055,26	6441,46
900	4389,19	5576,51	6454,34	6893,26	7332,18
1000	4923,42	6271,24	7255,93	7748,27	8240,61
1100	5464,61	6975,05	8067,97	8614,43	9160,89
1200	6009,39	7690,45	8892,33	9493,27	10094,21
1300	6557,79	8414,07	9725,63	10381,40	11037,18
1400	7109,68	9145,16	10567,10	11278,07	11989,04
1500	7668,54	9883,72	11417,43	12184,29	12951,14
1600	8227,55	10651,18	12296,69	13119,45	13942,20

Tab. 5. 3 Entalpie spalin



Obr. 5. 1 Diagram spalín

Z předešlých výpočtu vyplývá, že při spalování různých druhů paliv se mění množství vzniklých spalín i množství spalovacího vzduchu, viz Obr. 5. 2. Při spalování paliva 2 bude větší průtok spalín, což se projeví větší tlakovou ztrátou a větší intenzitou abraze.



Obr. 5. 2 Porovnání množství spalín a vzduchu

## 6 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK PRO PALIVO 1

Dodavatel kotle určuje množství odváděného popela ve formě strusky a popílku a zároveň určuje v závislosti na účinnosti spalování obsah spalitelných látek ve strusce a v popílku.

Pro stanovení obsahu spalitelných látek jsou použity následující vztahy:

### 6.1 Stanovení obsahu spalitelných látek ve strusce

$$C_{\text{str}} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_p)}{X_{\text{str}} + z_0 - a_p} \quad [\%] \quad (6.1)$$

$$\text{kde} \quad z_0 = \frac{100 \cdot K_s \cdot Q_{\text{nr}}}{A^r \cdot Q_{\text{nc}}} \quad [\%] \quad (6.2)$$

$$a_p = \frac{C_{\text{pop}} \cdot X_{\text{pop}}}{100 - C_{\text{pop}}} \quad [\%] \quad (6.3)$$

Pro práškové kotle platí:

- běžné provedení hořáků a ohniště,  $K_s = 3\%$
- spalovací zařízení s vyšší účinností (s menším obsahem spalitelných látek)  
 $3\% > K_s \geq 2\%$  (výjimečně 1,5)

Pro roštové kotle platí:

- $9\% \geq K_s \geq 4\%$
- pro hnědá uhlí s malou výhřevností  $K_s = 9\%$
- pro černá uhlí s velkou výhřevností  $K_s = 4\%$

dále	$C_{\text{str}}$	$[\%]$	je obsah spalitelných látek ve strusce (počítá se)
	$C_{\text{pop}}$	$[\%]$	je obsah spalitelných látek v popílku (volí se)
	$X_{\text{str}}$	$[\%]$	je množství popela odváděného jako struska
	$X_{\text{pop}}$	$[\%]$	je množství popela odváděného jako popílek
	$Q_{\text{nr}}$	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je redukovaná výhřevnost
	$Q_{\text{nc}}$	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je výhřevnost uhlíku

## 6.2 Stanovení obsahu spalitelných látek v popílku

$$C_{\text{pop}} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_s)}{X_{\text{pop}} + z_0 - a_s} \quad [\%] \quad (6.4)$$

$$\text{kde } z_0 = \frac{100 \cdot K_s \cdot Q_{\text{nr}}}{A^r \cdot Q_{\text{nc}}} \quad [\%] \quad (6.5)$$

$$a_s = \frac{C_{\text{str}} \cdot X_{\text{str}}}{100 - C_{\text{str}}} \quad [\%] \quad (6.6)$$

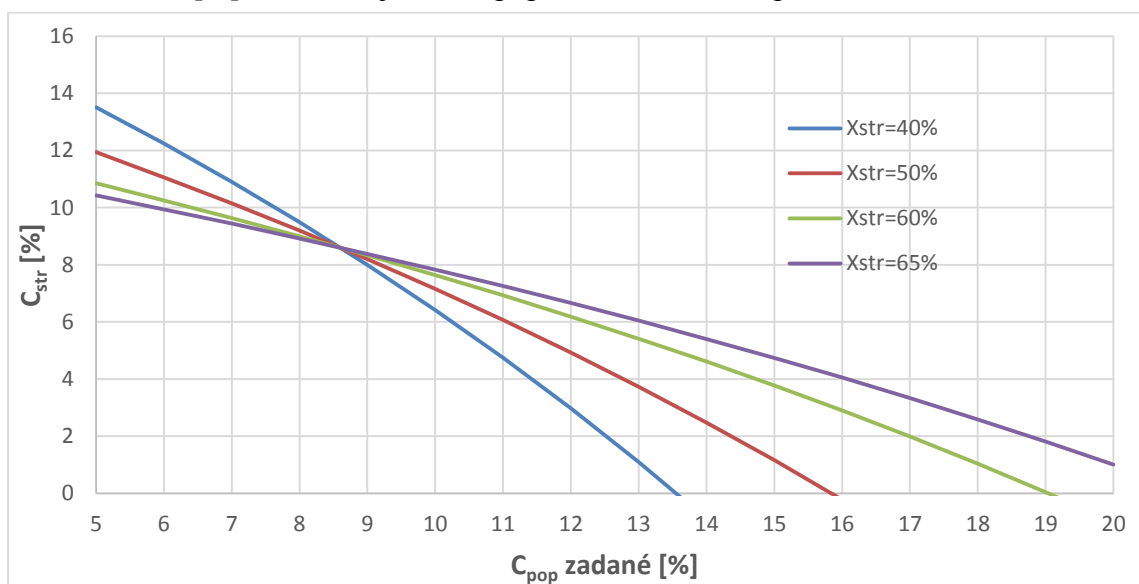
Pro práškové kotle platí:

- běžné provedení hořáků a ohniště,  $K_s = 3\%$
- spalovací zařízení s vyšší účinností (s menším obsahem spalitelných látek)  
 $3\% > K_s \geq 2\%$  (výjimečně 1,5)

Pro roštové kotle platí:

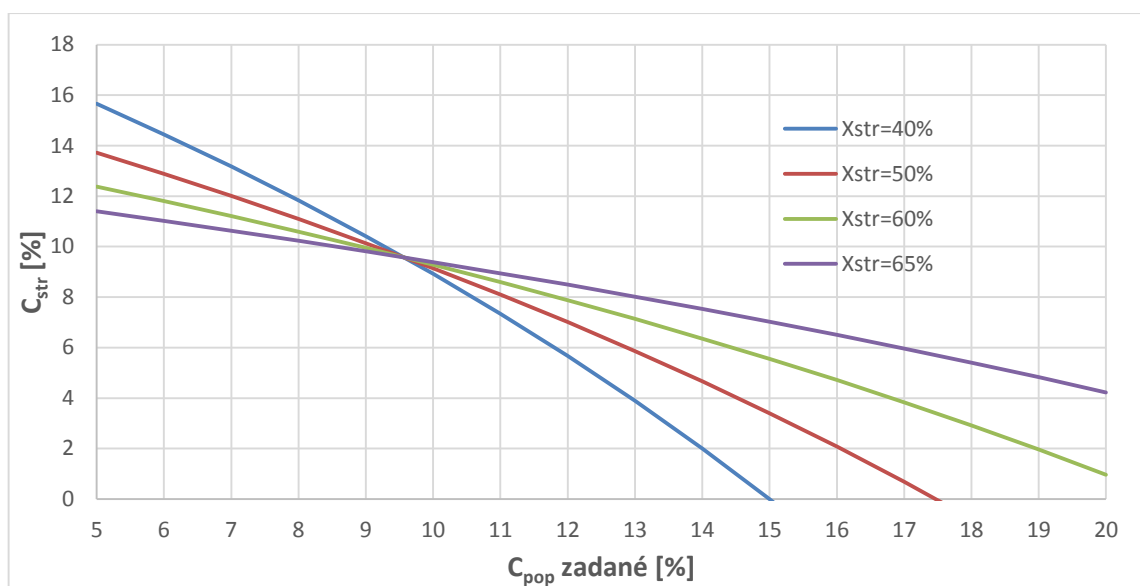
- $9\% \geq K_s \geq 4\%$
- pro hnědá uhlí s malou výhřevností  $K_s = 9\%$
- pro černá uhlí s velkou výhřevností  $K_s = 4\%$

dále	$C_{\text{str}}$	[%]	je obsah spalitelných látek ve strusce (volí se)
	$C_{\text{pop}}$	[%]	je obsah spalitelných látek v popílku (počítá se)
	$X_{\text{str}}$	[%]	je množství popela odváděného jako struska
	$X_{\text{pop}}$	[%]	je množství popela odváděného jako popílek
	$Q_{\text{nr}}$	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukovaná výhřevnost
	$Q_{\text{nc}}$	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]	je výhřevnost uhlíku
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém palivu

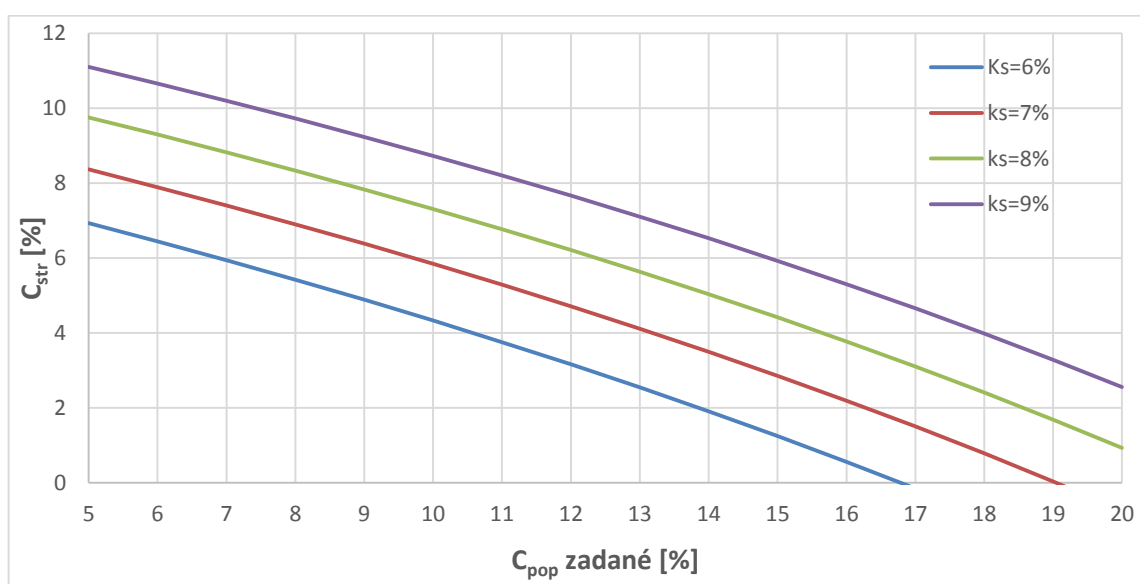


Obr. 6. 1 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $K_s = 8\%$





Obr. 6. 2 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $K_s = 9\%$



Obr. 6. 3 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $X_{str} = 65\%$

Z výše uvedeného postupu pro stanovení obsahu spalitelných látek v tuhých zbytcích jsem určil obsah spalitelných látek ve strusce pro další výpočty  $C_{str} = 4,7383\%$ , při hodnotách  $C_{pop} = 15\%$ ,  $X_{pop} = 35\%$ ,  $X_{str} = 65\%$  a  $K_s = 8\%$ .

## 7 STANOVENÍ OBSAHU SPALITELNÝCH LÁTEK PRO PALIVO 2

Dodavatel kotle určuje množství odváděného popela ve formě strusky a popílku a zároveň určuje v závislosti na účinnosti spalování obsah spalitelných látek ve strusce a v popílku.

Pro stanovení obsahu spalitelných látek jsou použity následující vztahy:

### 7.1 Stanovení obsahu spalitelných látek ve strusce

$$C_{\text{str}} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_p)}{X_{\text{str}} + z_0 - a_p} \quad [\%] \quad (6.1)$$

$$\text{kde} \quad z_0 = \frac{100 \cdot K_s \cdot Q_{\text{nr}}}{A^r \cdot Q_{\text{nc}}} \quad [\%] \quad (6.2)$$

$$a_p = \frac{C_{\text{pop}} \cdot X_{\text{pop}}}{100 - C_{\text{pop}}} \quad [\%] \quad (6.3)$$

Pro práškové kotle platí:

- běžné provedení hořáků a ohniště,  $K_s = 3\%$
- spalovací zařízení s vyšší účinností (s menším obsahem spalitelných látek)  
 $3\% > K_s \geq 2\%$  (výjimečně 1,5)

Pro roštové kotle platí:

- $9\% \geq K_s \geq 4\%$
- pro hnědá uhlí s malou výhřevností  $K_s = 9\%$
- pro černá uhlí s velkou výhřevností  $K_s = 4\%$

dále	$C_{\text{str}}$	$[\%]$	je obsah spalitelných látek ve strusce (počítá se)
	$C_{\text{pop}}$	$[\%]$	je obsah spalitelných látek v popílku (volí se)
	$X_{\text{str}}$	$[\%]$	je množství popela odváděného jako struska
	$X_{\text{pop}}$	$[\%]$	je množství popela odváděného jako popílek
	$Q_{\text{nr}}$	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je redukovaná výhřevnost
	$Q_{\text{nc}}$	$[\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je výhřevnost uhlíku

## 7.2 Stanovení obsahu spalitelných látek v popílku

$$C_{\text{pop}} = \frac{100 \cdot (z_0 - a_s)}{X_{\text{pop}} + z_0 - a_s} \quad [\%] \quad (6.4)$$

$$\text{kde } z_0 = \frac{100 \cdot K_s \cdot Q_{\text{nr}}}{A^r \cdot Q_{\text{nc}}} \quad [\%] \quad (6.5)$$

$$a_s = \frac{C_{\text{str}} \cdot X_{\text{str}}}{100 - C_{\text{str}}} \quad [\%] \quad (6.6)$$

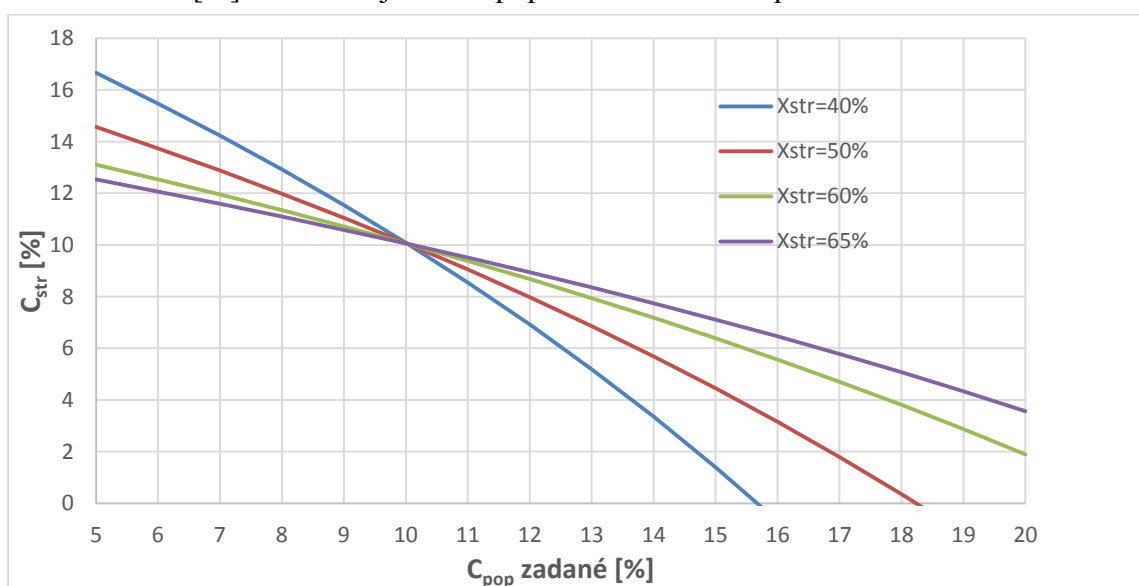
Pro práškové kotle platí:

- běžné provedení hořáků a ohniště,  $K_s = 3\%$
- spalovací zařízení s vyšší účinností (s menším obsahem spalitelných látek)  
 $3\% > K_s \geq 2\%$  (výjimečně 1,5)

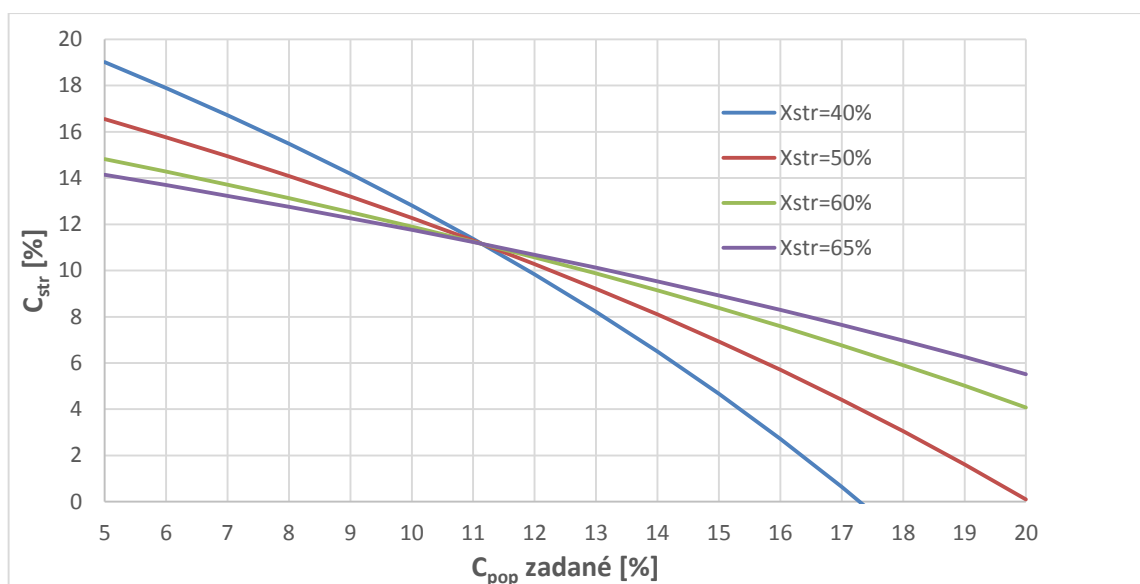
Pro roštové kotle platí:

- $9\% \geq K_s \geq 4\%$
- pro hnědá uhlí s malou výhřevností  $K_s = 9\%$
- pro černá uhlí s velkou výhřevností  $K_s = 4\%$

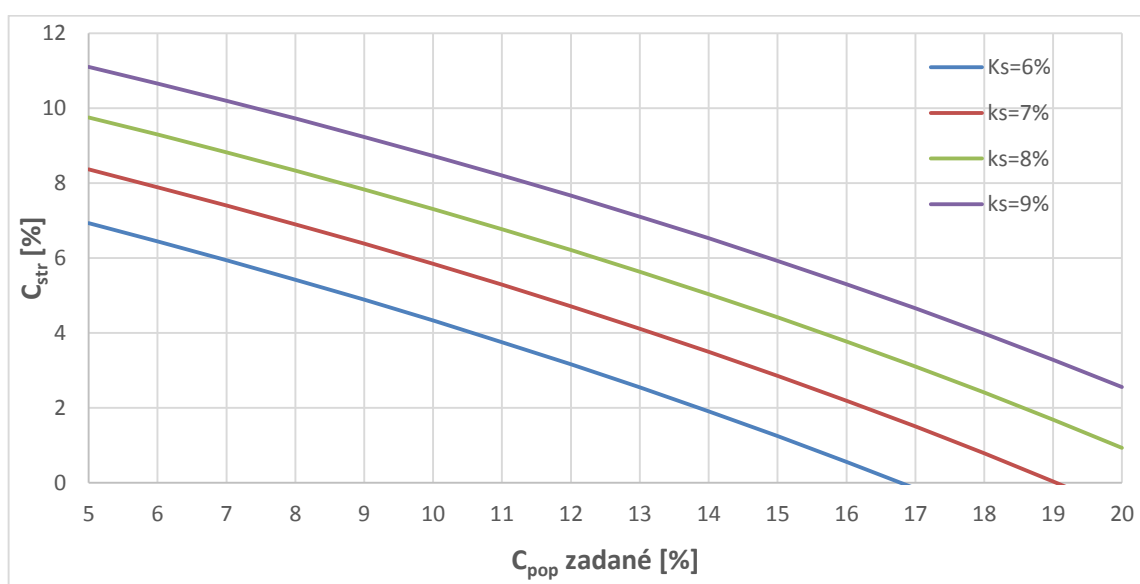
dále	$C_{\text{str}}$	[%]	je obsah spalitelných látek ve strusce (volí se)
	$C_{\text{pop}}$	[%]	je obsah spalitelných látek v popílku (počítá se)
	$X_{\text{str}}$	[%]	je množství popela odváděného jako struska
	$X_{\text{pop}}$	[%]	je množství popela odváděného jako popílek
	$Q_{\text{nr}}$	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukovaná výhřevnost
	$Q_{\text{nc}}$	[MJ · kg <sup>-1</sup> ]	je výhřevnost uhlíku
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém palivu



Obr. 7. 1 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $K_s = 8\%$



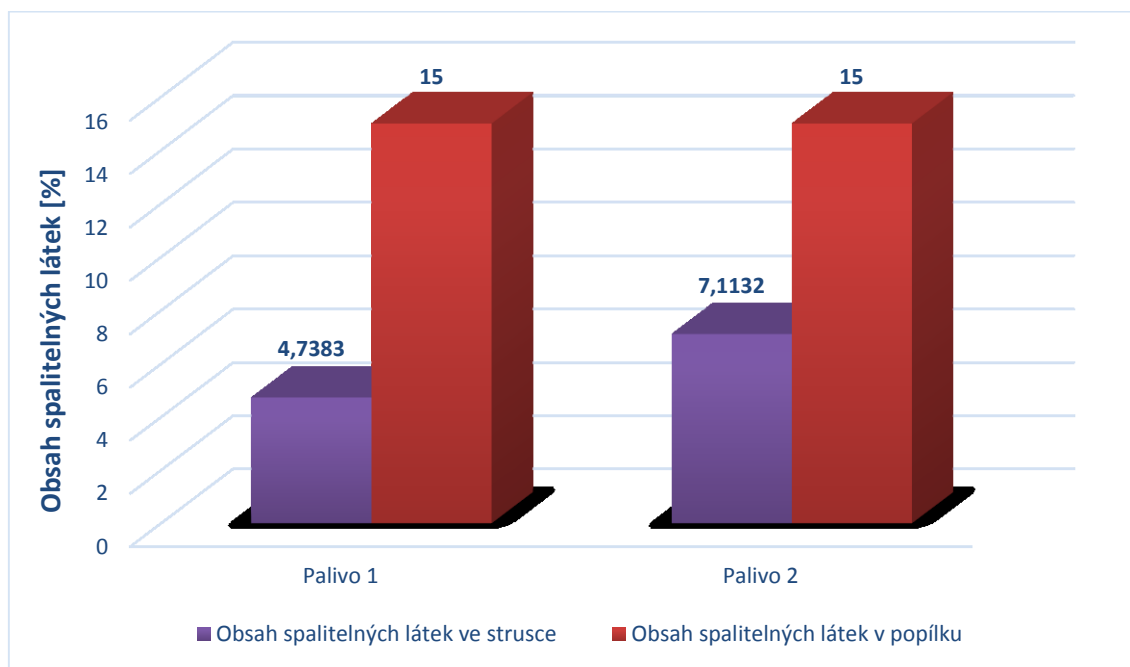
Obr. 7. 2 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $K_s = 9\%$



Obr. 7. 3 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích,  $X_{str} = 65\%$

Z výše uvedeného postupu pro stanovení obsahu spalitelných látek v tuhých zbytcích jsem určil obsah spalitelných látek ve strusce pro další výpočty  $C_{str} = 7,1132\%$ , při hodnotách  $C_{pop} = 15\%$ ,  $X_{pop} = 35\%$ ,  $X_{str} = 65\%$  a  $K_s = 8 \%$ .

Z předešlých výpočtu vyplývá, že dvě odlišná paliva mají různý obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích. Pro zadaný obsah spalitelných látek v popílku  $C_{\text{pop}} = 15 \%$  jsem u obou paliv dopočítal obsah spalitelných látek ve strusce při součiniteli  $K_s = 8 \%$ ,  $X_{\text{pop}} = 35\%$ ,  $X_{\text{str}} = 65\%$ . Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 7. 4.



Obr. 7. 4 Porovnání obsahu spalitelných látek v tuhých zbytcích

## 8 TEPELNÁ BILANCE KOTLE PRO PALIVO 1

### 8.1 Teplo přivedené do kotle

Teplo přivedené do kotle na 1kg paliva (redukována výhřevnost):

$$Q_{i\text{red}} = Q_i^r + i_{pv} = 11500 + 38,5120 = 11538,5120 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (8.1)$$

kde  $Q_i^r$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost paliva  
 $i_{pv}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je fyzické teplo přivedené v palivu

Fyzické teplo paliva se počítá pouze tehdy, jestliže se palivo předeřívá mimo kotel (např. parou při spalování mazutu) a v případech sušení paliva v otevřeném mlecím okruhu, kdy se z bilančního hlediska posuzuje stav paliva na vstupu do spalovací komory. V případech, kdy palivo není předeříváno cizím zdrojem, uvažuje se fyzické teplo jen u paliv splňující podmínku:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{150 \cdot 4,19} \quad [\%] \quad (8.2)$$

$$26\% \geq \frac{11500}{150 \cdot 4,19} = 18,2975\%$$

kde  $Q_i^r$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost paliva

V tomto případě je podmínka splněna, pak uvažuji teplotu paliva  $t_{pv} = 20^\circ\text{C}$ .

#### Fyzické teplota paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 1,9256 \cdot 20 = 38,5120 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (8.3)$$

kde  $c_{pv}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita paliva  
 $t_{pv}$  [°C] je teplota paliva  $t_{pv} = 20^\circ\text{C}$  dle [1]

#### Měrná tepelná kapacita paliva

$$c_{pv} = c_w \cdot \frac{W^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{26}{100} + 1,13 \cdot \frac{100 - 26}{100} = 1,9256 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (8.4)$$

kde  $W^r$  [%] je obsah vody v surovém vzorku paliva  
 $c_w$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrné teplo vody, dle [1]  $c_w = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $c_{su}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrné teplo sušiny paliva, dle [1]  $c_{su} = 1,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

## 8.2 Ztráty a tepelná účinnost kotle

Tepelná účinnost kotle je závislá na velikosti jednotlivých tepelných ztrát samotného kotle, kdy velikost jednotlivých tepelných ztrát při návrhu nového kotle je nutno předem odhadnout. Při spalování tuhých paliv obvykle uvažujeme pět základních ztrát:

- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- ztráta citelným teplem spalín (komínová)

### 8.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Tato ztráta představuje nespálenou hořlavinou (uhlík) v tuhých zbytcích, kde množství těchto tuhých zbytků odváděných z kotle ze spalovací komory a v úletu jsem stanovil dle literatury [1].

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} = 2,7404 + 5,2352 = \underline{7,9755\%} \quad (8.5)$$

kde  $Z_{cs}$  [%] je ztráta ve škváře (strusce)  
 $Z_{cú}$  [%] je ztráta v úletu

#### Ztráta ve škváře (strusce)

$$Z_{cs} = \frac{C_{str}}{100 - C_{str}} \cdot \frac{X_{str}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{cs} = \frac{4,7383}{100 - 4,7383} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{30}{11538,5120} \cdot 32600 = 2,7404\% \quad (8.6)$$

kde  $C_{str}$  [%] je obsah spalitelných látek ve strusce, viz kapitola 6  
 $X_{str}$  [%] je množství popela odváděného jako struska  
 $A^r$  [%] je obsah popelovin v surovém stavu  
 $Q_{ired}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je redukováná výhřevnost  
 $Q_{cs}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost hořlaviny v tuhém zbytků (škvára, struska)

### Ztráta v úletu

$$Z_{\text{cú}} = \frac{C_{\text{pop}}}{100 - C_{\text{pop}}} \cdot \frac{X_{\text{pop}}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{\text{ired}}} \cdot Q_{\text{cú}} = \frac{15}{100 - 15} \cdot \frac{35}{100} \cdot \frac{30}{11538,5120} \cdot 32600 = 5,2352\% \quad (8.7)$$

kde	$C_{\text{pop}}$	[%]	je obsah spalitelných látek v popílku, viz Tab. 3. 2
	$X_{\text{pop}}$	[%]	je množství popela odváděného jako popílek
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém stavu
	$Q_{\text{ired}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukováná výhřevnost
	$Q_{\text{cú}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je výhřevnost hořlaviny v tuhém zbytků (úlet)

### 8.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)

Tato ztráta představuje množství tepla, které bylo ztraceno v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách, převážně CO, H<sub>2</sub> a CH<sub>x</sub>. Dosahuje velmi malých hodnot řádově kolem pár desetin procenta. Tuto ztrátu jsem stanovil dle literatury [1].

$$Z_{\text{co}} = \underline{0,5\%}$$

### 8.2.3 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Tato ztráta představuje množství tepla, které uniká do okolí skrz plášť kotle. Je ovlivněna kvalitou izolace stěn, velikosti povrchu a výkonu kotle. Hodnotu ztráty sáláním a vedením tepla do okolí volím dle dokumentace [1].

$$Z_{\text{sv}} = \underline{1,4\%}$$

### 8.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Tato ztráta představuje nevyužité teplo odcházející v tuhých zbytcích. Hodnoty  $X_i$ ,  $C_i$ ,  $A^r$ ,  $Q_{\text{ired}}$  jsou stejné, jako u výpočtu ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích.

#### Ztráta ve škváře (strusce)

$$Z_{\text{š}} = \frac{X_{\text{str}}}{100 - C_{\text{str}}} \cdot \frac{A^r}{Q_{\text{ired}}} \cdot c_{\text{str}} \cdot t_s = \frac{65}{100 - 4,7383} \cdot \frac{30}{11538,5120} \cdot 1,01 \cdot 600 = 1,0751\% \quad (8.8)$$

kde	$C_{\text{str}}$	[%]	je obsah spalitelných látek ve strusce, viz kapitola 6
	$X_{\text{str}}$	[%]	je množství popela odváděného jako struska
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém stavu
	$Q_{\text{ired}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukováná výhřevnost



$t_s$  [°C] je teplota škváry, strusky  
 $c_{str}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita strusky,  $c_{str} = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_s$   
 dle literatury [2]

Ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků v popílku nepočítám, protože ji zahrnuji ve ztrátě citelným teplem spalín (komínové), viz kapitola 8.2.5.

### 8.2.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)

Tato ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Tato ztráta je nejvýznamnější, protože nám nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Na tuto ztrátu má rozhodující vliv teplota spalín  $t_{sp} = 150^\circ\text{C}$  a přebytek vzduchu za kotlem  $\alpha_k = 1,6$ .

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp}^{t_k, \alpha_k} - I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}} = (100 - 7,9755) \cdot \frac{1171,9105 - 154,3982}{11538,512} = 8,1151\% \quad (8.9)$$

kde  $I_{sp}^{t_k, \alpha_k}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je entalpie spalín při teplotě spalín  $t_{sp} = 150^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_k = 1,6$   
 $I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je entalpie spalín při teplotě vzduchu  $t_{vz} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_k = 1,6$

Tento výpočet byl proveden podle postupu uvedeného v literatuře [1, str. 45].

### 8.2.6 Tepelná účinnost kotle

Z vypočtených jednotlivých tepelných ztrát je možné určit tepelnou účinnost kotle nepřímou metodou podle vztahu:

$$\eta_k = 100 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_{fs} - Z_k \quad [\%] \quad (8.10)$$

$$\eta_k = 100 - 7,9755 - 0,5 - 1,4 - 1,0751 - 8,1151$$

$$\underline{\underline{\eta_k = 80,9343\%}}$$

Tato hodnota účinnosti je v souladu s předpokládanou účinností dodavatele, která je 81 %.

## 8.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

### 8.3.1 Výrobní teplo páry

Výrobní teplo páry určíme ze vztahu:

$$Q_v = m_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + m_{odl} \cdot (i_{odl} - i_{nv}) \quad [\text{kW}] \quad (8.11)$$

$$Q_v = \frac{50}{3,6} \cdot (3363 - 492) + \frac{50}{3,6} \cdot 0,04 \cdot (1537 - 492) = 40455,56 \text{ kW}$$

kde	$i_{pp}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie přehřáté páry při teplotě 505°C a tlaku 12MPa
	$i_{NV}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie napájecí vody při teplotě 115°C a tlaku 13,3MPa
	$i_{ODL}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie odluhu při suchosti v bubnu $x = 0$ a tlaku v bubnu 13,14MPa

### 8.3.2 Množství paliva

Množství paliva přivedeného do kotle

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{ired} \cdot \frac{\eta_k}{100}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8.12)$$

$$M_{pal} = \frac{40455,56}{11538,5120 \cdot \frac{80,9343}{100}} = 4,3321 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 15,5956 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde	$Q_v$	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}], [\text{kW}]$	je výrobní teplo páry
	$Q_{ired}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je redukováná výhřevnost
	$\eta_k$	$[\%]$	je tepelná účinnost kotle

Množství paliva skutečně spáleného (výpočtové)

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (8.13)$$

$$M_{pv} = 4,3321 \cdot \left(1 - \frac{7,9755}{100}\right) = 3,9866 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 14,3518 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde	$M_{pal}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	je množství paliva přivedeného do kotle
	$Z_c$	$[\%]$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

## 9 TEPELNÁ BILANCE KOTLE PRO PALIVO 2

### 9.1 Teplo přivedené do kotle

Teplo přivedené do kotle na 1kg paliva (redukována výhřevnost):

$$Q_{i\text{red}} = Q_i^r + i_{pv} = 12500 + 37,9 = 12537,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (9.1)$$

kde  $Q_i^r$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost paliva  
 $i_{pv}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je fyzické teplo přivedené v palivu

Fyzické teplo paliva se počítá pouze tehdy, jestliže se palivo předeřívá mimo kotel (např. parou při spalování mazutu) a v případech sušení paliva v otevřeném mlecím okruhu, kdy se z bilančního hlediska posuzuje stav paliva na vstupu do spalovací komory. V případech, kdy palivo není předeříváno cizím zdrojem, uvažuje se fyzické teplo jen u paliv splňující podmínku:

$$W^r \geq \frac{Q_i^r}{150 \cdot 4,19} \quad [\%] \quad (9.2)$$

$$25\% \geq \frac{12500}{150 \cdot 4,19} = 19,8886\%$$

kde  $Q_i^r$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost paliva

V tomto případě je podmínka splněna, pak uvažuji teplotu paliva  $t_{pv} = 20^\circ\text{C}$ .

#### Fyzické teplota paliva

$$i_{pv} = c_{pv} \cdot t_{pv} = 1,8950 \cdot 20 = 37,9 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (9.3)$$

kde  $c_{pv}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita paliva  
 $t_{pv}$  [°C] je teplota paliva  $t_{pv} = 20^\circ\text{C}$  dle [1]

#### Měrná tepelná kapacita paliva

$$c_{pv} = c_w \cdot \frac{W^r}{100} + c_{su} \cdot \frac{100 - W^r}{100} = 4,19 \cdot \frac{25}{100} + 1,13 \cdot \frac{100 - 25}{100} = 1,8950 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9.4)$$

kde  $W^r$  [%] je obsah vody v surovém vzorku paliva  
 $c_w$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrné teplo vody, dle [1]  $c_w = 4,19 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $c_{su}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrné teplo sušiny paliva, dle [1]  $c_{su} = 1,13 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

## 9.2 Ztráty a tepelná účinnost kotle

Tepelná účinnost kotle je závislá na velikosti jednotlivých tepelných ztrát samotného kotle, kdy velikost jednotlivých tepelných ztrát při návrhu nového kotle je nutno předem odhadnout. Při spalování tuhých paliv obvykle uvažujeme pět základních ztrát:

- ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích (mechanický nedopal)
- ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)
- ztráta sáláním a vedením tepla do okolí
- ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
- ztráta citelným teplem spalin (komínová)

### 9.2.1 Ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Tato ztráta představuje nespálenou hořlavinou (uhlík) v tuhých zbytcích, kde množství těchto tuhých zbytků odváděných z kotle ze spalovací komory a v úletu jsem stanovil dle literatury [1].

$$Z_c = Z_{cs} + Z_{cú} = 3,5592 + 4,4164 = \underline{7,9755\%} \quad (9.5)$$

kde  $Z_{cs}$  [%] je ztráta ve škváře (strusce)  
 $Z_{cú}$  [%] je ztráta v úletu

#### Ztráta ve škváře (strusce)

$$Z_{cs} = \frac{C_{str}}{100 - C_{str}} \cdot \frac{X_{str}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{ired}} \cdot Q_{cs} = \frac{7,1132}{100 - 7,1132} \cdot \frac{65}{100} \cdot \frac{27,5}{12537,9} \cdot 32600 = 3,5592\% \quad (9.6)$$

kde  $C_{str}$  [%] je obsah spalitelných látek ve strusce, viz kapitola 7  
 $X_{str}$  [%] je množství popela odváděného jako struska  
 $A^r$  [%] je obsah popelovin v surovém stavu  
 $Q_{ired}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je redukováná výhřevnost  
 $Q_{cs}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je výhřevnost hořlaviny v tuhém zbytků (škvára, struska)

### Ztráta v úletu

$$Z_{\text{cú}} = \frac{C_{\text{pop}}}{100 - C_{\text{pop}}} \cdot \frac{X_{\text{pop}}}{100} \cdot \frac{A^r}{Q_{\text{ired}}} \cdot Q_{\text{cú}} = \frac{15}{100 - 15} \cdot \frac{35}{100} \cdot \frac{27,5}{12537,9} \cdot 32600 = 4,4164\% \quad (9.7)$$

kde	$C_{\text{pop}}$	[%]	je obsah spalitelných látek v popílku, viz Tab. 3. 2
	$X_{\text{pop}}$	[%]	je množství popela odváděného jako popílek
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém stavu
	$Q_{\text{ired}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukováná výhřevnost
	$Q_{\text{cú}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je výhřevnost hořlaviny v tuhém zbytků (úlet)

### 9.2.2 Ztráta hořlavinou ve spalínách (chemický nedopal)

Tato ztráta představuje množství tepla, které bylo ztraceno v důsledku přítomnosti nespálených plynů ve spalínách, převážně CO, H<sub>2</sub> a CH<sub>x</sub>. Dosahuje velmi malých hodnot řádově kolem pár desetin procenta. Tuto ztrátu jsem stanovil dle literatury [1].

$$Z_{\text{co}} = \underline{0,5\%}$$

### 9.2.3 Ztráta sáláním a vedením tepla do okolí

Tato ztráta představuje množství tepla, které uniká do okolí skrz plášť kotle. Je ovlivněna kvalitou izolace stěn, velikosti povrchu a výkonu kotle. Hodnotu ztráty sáláním a vedením tepla do okolí volím dle dokumentace [1].

$$Z_{\text{sv}} = \underline{1,4\%}$$

### 9.2.4 Ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků

Tato ztráta představuje nevyužité teplo odcházející v tuhých zbytcích. Hodnoty  $X_i$ ,  $C_i$ ,  $A^r$ ,  $Q_{\text{ired}}$  jsou stejné, jako u výpočtu ztráty hořlavinou v tuhých zbytcích.

#### Ztráta ve škváře (strusce)

$$Z_{\text{š}} = \frac{X_{\text{str}}}{100 - C_{\text{str}}} \cdot \frac{A^r}{Q_{\text{ired}}} \cdot c_{\text{str}} \cdot t_s = \frac{65}{100 - 7,1132} \cdot \frac{27,5}{12537,9} \cdot 1,01 \cdot 600 = 0,9301\% \quad (9.8)$$

kde	$C_{\text{str}}$	[%]	je obsah spalitelných látek ve strusce, viz kapitola 7
	$X_{\text{str}}$	[%]	je množství popela odváděného jako struska
	$A^r$	[%]	je obsah popelovin v surovém stavu
	$Q_{\text{ired}}$	[kJ · kg <sup>-1</sup> ]	je redukováná výhřevnost

$t_s$  [°C] je teplota škváry, strusky  
 $c_{str}$  [kJ · kg<sup>-1</sup> · K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita strusky,  $c_{str} = 0,71 + 0,5 \cdot 10^{-3} \cdot t_s$   
 dle literatury [2]

Ztrátu fyzickým teplem tuhých zbytků v popílku nepočítám, protože ji zahrnuji ve ztrátě citelným teplem spalín (komínové), viz kapitola 9.2.5.

### 9.2.5 Ztráta citelným teplem spalín (komínová)

Tato ztráta představuje teplo odcházející z kotle v kouřových plynech. Tato ztráta je nejvýznamnější, protože nám nejvíce ovlivňuje výslednou účinnost kotle. Na tuto ztrátu má rozhodující vliv teplota spalín  $t_{sp} = 150^\circ\text{C}$  a přebytek vzduchu za kotlem  $\alpha_k = 1,6$ .

$$Z_k = (100 - Z_c) \cdot \frac{I_{sp}^{t_k, \alpha_k} - I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}}{Q_{ired}} = (100 - 7,9755) \cdot \frac{1248,7792 - 165,0647}{12537,9} = 7,9541\% \quad (9.9)$$

kde  $I_{sp}^{t_k, \alpha_k}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je entalpie spalín při teplotě spalín  $t_{sp} = 150^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_k = 1,6$   
 $I_{sp}^{t_{vz}, \alpha_k}$  [kJ · kg<sup>-1</sup>] je entalpie spalín při teplotě vzduchu  $t_{vz} = 20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha_k = 1,6$

Tento výpočet byl proveden podle postupu uvedeného v literatuře [1].

### 9.2.6 Tepelná účinnost kotle

Z vypočtených jednotlivých tepelných ztrát je možné určit tepelnou účinnost kotle nepřímou metodou podle vztahu:

$$\eta_k = 100 - Z_c - Z_{co} - Z_{sv} - Z_{fs} - Z_k = 100 \quad [\%] \quad (9.10)$$

$$\eta_k = 100 - 7,9755 - 0,5 - 1,4 - 0,9301 - 7,9541$$

$$\underline{\underline{\eta_k = 81,2402\%}}$$

Tato hodnota účinnosti je v souladu s předpokládanou účinností dodavatele, která je 81 %.

## 9.3 Výrobní teplo páry a množství paliva

### 9.3.1 Výrobní teplo páry

Výrobní teplo páry určíme ze vztahu:

$$Q_v = m_{pp} \cdot (i_{pp} - i_{nv}) + m_{odl} \cdot (i_{odl} - i_{nv}) \quad [\text{kW}] \quad (9.11)$$

$$Q_v = \frac{50}{3,6} \cdot (3363 - 492) + \frac{50}{3,6} \cdot 0,04 \cdot (1537 - 492) = 40455,56 \text{ kW}$$

kde	$i_{pp}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie přehřáté páry při teplotě 505°C a tlaku 12MPa
	$i_{NV}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie napájecí vody při teplotě 115°C a tlaku 13,3MPa
	$i_{ODL}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie odluhu při suchosti v bubnu $x = 0$ a tlaku v bubnu 13,14MPa

### 9.3.2 Množství paliva

**Množství paliva přivedeného do kotle**

$$M_{pal} = \frac{Q_v}{Q_{ired} \cdot \frac{\eta_k}{100}} \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.12)$$

$$M_{pal} = \frac{40455,56}{12537,9 \cdot \frac{81,2402}{100}} = 3,9718 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 14,2985 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde	$Q_v$	$[\text{kJ} \cdot \text{s}^{-1}], [\text{kW}]$	je výrobní teplo páry
	$Q_{ired}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je redukovaná výhřevnost
	$\eta_k$	$[\%]$	je tepelná účinnost kotle

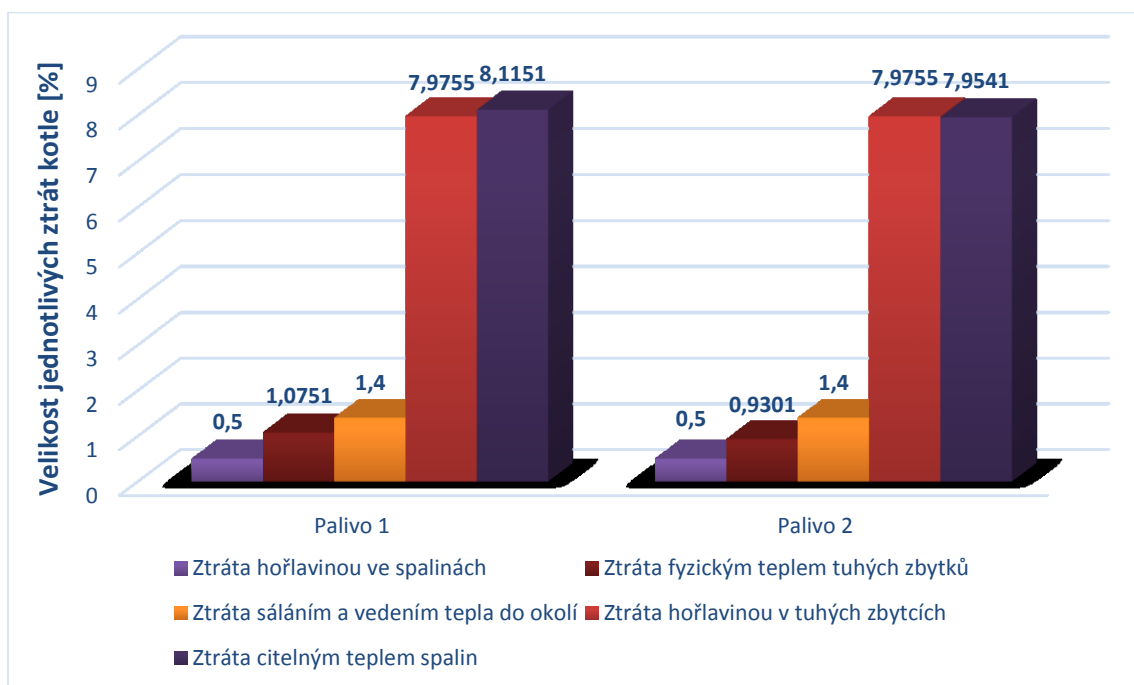
**Množství paliva skutečně spáleného (výpočtové)**

$$M_{pv} = M_{pal} \cdot \left(1 - \frac{Z_c}{100}\right) \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (9.13)$$

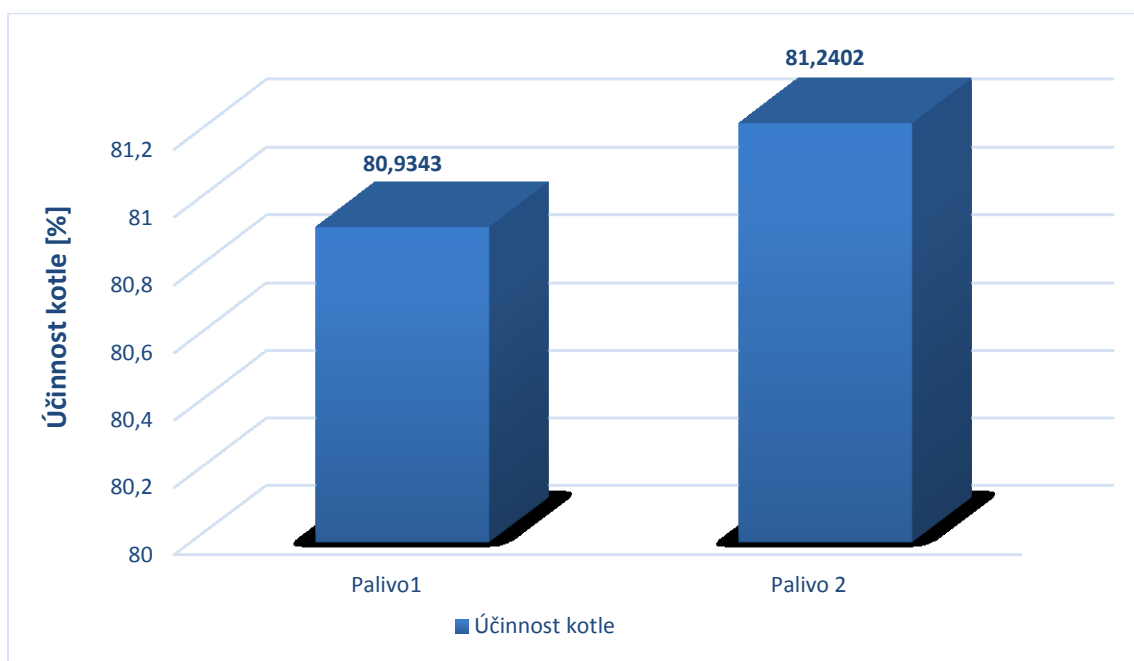
$$M_{pv} = 3,9718 \cdot \left(1 - \frac{7,9755}{100}\right) = 3,6550 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} = 13,1580 \text{ t} \cdot \text{h}^{-1}$$

kde	$M_{pal}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	je množství paliva přivedeného do kotle
	$Z_c$	$[\%]$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích

Z předešlých výpočtu vyplývá, že při spalování různých druhů paliv se mění velikost jednotlivých ztrát kotle, účinnost kotle i množství přivedeného paliva do kotle. Porovnání jednotlivých ztrát kotle pro jednotlivý druh paliva je zobrazeno na Obr. 9. 1. Na Obr. 9. 2 je znázorněna účinnost kotle při spalování paliva 1 a paliva 2 a na Obr. 9. 3 je znázorněna spotřeba obou paliv při spalovacím procesu.



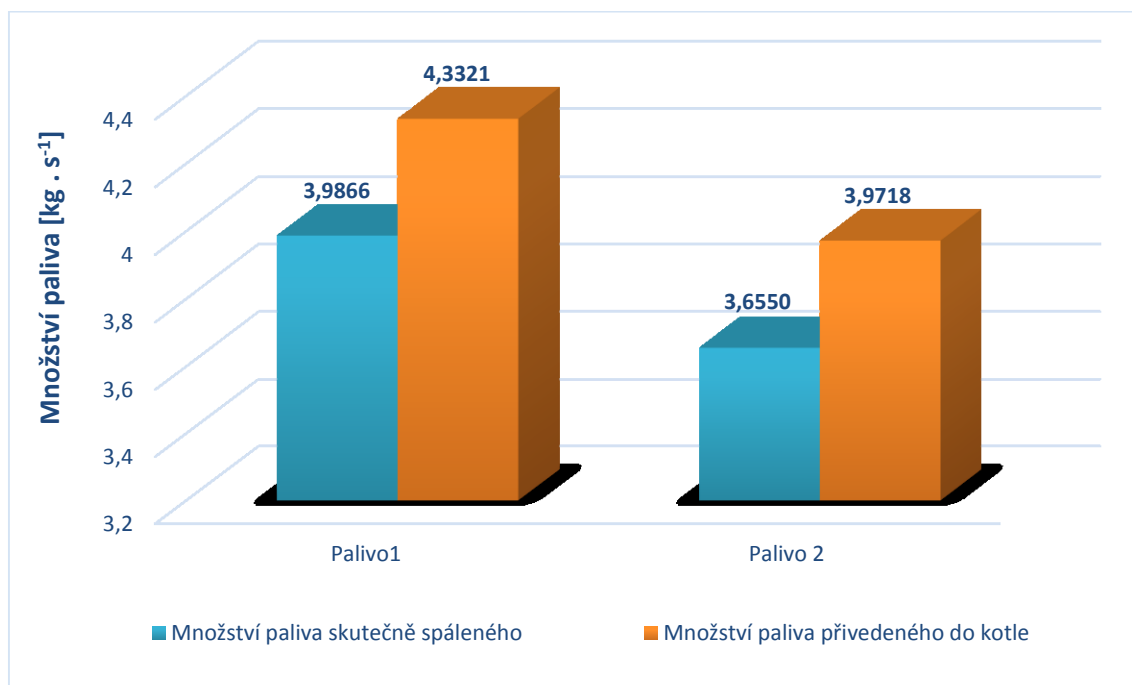
Obr. 9. 1 Porovnání jednotlivých ztrát kotle



Obr. 9. 2 Porovnání účinností kotle



Na níže uvedeném obrázku je vidět, že při spalování paliva 2 klesne spotřeba samotného paliva, a tím poklesne i množství produkovaných škodlivin při spalování, např. nižší produkce škodlivin  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$  a nižší produkce  $\text{CO}_2$ . Podíl  $\text{CO}_2$  i škodlivin se sníží při spalování paliva 2 zhruba o 8%.



Obr. 9. 3 Porovnání množství přivedeného a skutečně spáleného paliva

## 10 VÝPOČET SPALOVACÍ KOMORY

Účelem tohoto výpočtu je geometrický návrh ohniště, určení teploty nechlazeného plamene (adiabatické teploty) a stanovení teploty na výstupu z ohniště. Pro tyto výpočty použijí palivo 2 s výhřevností  $Q_i^r = 12500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### 10.1 Návrh velikosti ohniště

Konstrukční řešení spalovací komory je určeno zvoleným druhem paliva a způsobem jeho spalování. Při počátečním návrhu velikosti ohniště lze vyjít z doporučených hodnot součinitelů objemového a průřezového zatížení. Protože provozovatel rozhodl, že při rekonstrukci kotle se spalovací komora nebude měnit a zůstane původní – provede se jen výměna dožitých částí roštu, tak rozměry spalovací komory jsou dané a provedu tedy přepočet teploty na výstupu ze spalovací komory při spalování nového paliva.

#### Objemové tepelné zatížení ohniště

$$q_v = \frac{M_{\text{pal}} \cdot Q_i^r}{V_0} = \frac{3,9718 \cdot 12500}{336,980} = 147,327 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.1)$$

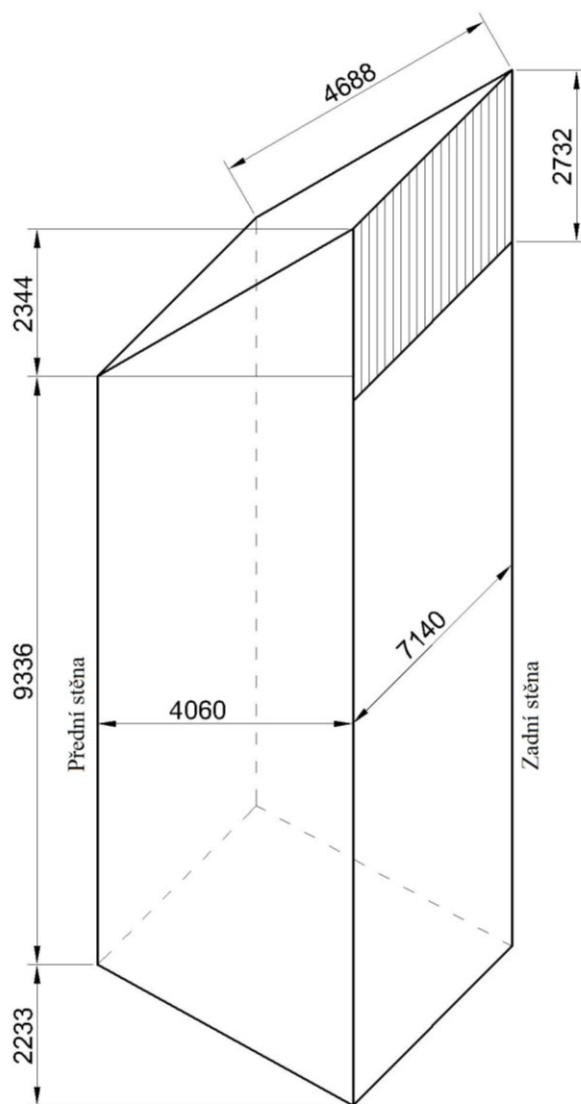
kde  $M_{\text{pal}}$   $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$  je množství paliva přivedeného do kotle  
 $Q_i^r$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je výhřevnost paliva  
 $V_0$   $[\text{m}^3]$  je objem spalovací komory

#### Průřezové tepelné zatížení ohniště

$$q_s = \frac{M_{\text{pal}} \cdot Q_i^r}{S_0} = \frac{3,9718 \cdot 12500}{28,988} = 1712,692 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (10.2)$$

kde  $M_{\text{pal}}$   $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$  je množství paliva přivedeného do kotle  
 $Q_i^r$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je výhřevnost paliva  
 $S_0$   $[\text{m}^2]$  je průřez spalovací komory

Rozměry a provedení spalovací komory zůstávají tedy původní. Parametry pak jsou, průměr trubek  $d=70$  mm, rozteč trubek  $s=140$  mm a výška mříže  $h_{mř}=2732$  mm.



Obr. 10. 1 Zjednodušené schéma spalovací komory

### Projekční povrch stěn ohniště

Celkový projekční povrch stěn ohniště  $S_{st}$  [m<sup>2</sup>] je určen jako suma jednotlivých ploch ohraničujících objem ohniště. Dle literatury [1] se projekčním povrchem stěn rozumí jejich plošný průmět bez respektování konstrukčního uspořádání trubek na stěnách. Počítá se pak jako součin příčného rozestupu „ $b_i$ “ mezi dvěma krajními trubkami plochy a osávané délky „ $l_i$ “.

$$S_{st} = \sum b_i \cdot l_i \quad [m^2] \quad (10.3)$$

$$S_{st} = 4,060 \cdot 9,336 \cdot 2 + 7,140 \cdot 9,336 + 7,140 \cdot 11,680 + 4,060 \cdot 2,344 + 7,140 \cdot 4,688 - 2,732 \cdot 7,140 = 249,345 \text{ m}^2$$

## Účinná sálavá plocha stěn ohniště

Je určena jako spojitá výhřevná plocha, která se rovná skutečné nezanesené a nezakryté výhřevné ploše všech jednotlivých ploch, které se v ohništi nacházejí.

$$S_{\text{ús}} = S_{\text{st}} \cdot x = 249,345 \cdot 0,9 = 224,411 \text{ m}^2 \quad (10.4)$$

kde  $S_{\text{st}}$  [m<sup>2</sup>] je projekční povrch stěn ohniště  
 $x$  [1] je úhlový součinitel osálání trubkové stěny, voleno dle literatury [6, str. 239]

## 10.2 Tepelný výpočet ohniště

Tepelný výpočet ohniště ve spalovací komoře je založen na principech teorie podobnosti tepelných procesů probíhajících ve spalovací komoře. Cílem tohoto výpočtu je určení střední teploty odchozích spalin  $t_{\text{ok}}$ . Pro výpočet se u nás nejčastěji používá Gurvičův poloempirický vztah pro poměrnou teplotu spalin na výstupu z ohniště.

### 10.2.1 Poměrná teplota spalin na výstupu z ohniště

$$\Theta_{\text{ok}} = \frac{T_{\text{ok}}}{T_{\text{np}}} = \frac{Bo^{0,6}}{M \cdot a_0^{0,6} + Bo^{0,6}} \quad [1] \quad (10.5)$$

kde  $T_{\text{np}}$  [K] je teplota nechlazeného plamene  
 $T_{\text{ok}}$  [K] je teplota spalin na výstupu z ohniště  
 $Bo$  [1] je Boltzmannovo číslo  
 $M$  [1] je součinitel charakterizující průběh teploty po výšce ohniště  
 $a_0$  [1] je stupeň černosti ohniště

V praxi se využívá vztahu pro výpočet teploty spalin na výstupu z ohniště  $t_{\text{ok}}$ :

$$t_{\text{ok}} = \frac{t_{\text{np}} + 273,15}{1 + M \cdot \left(\frac{a_0}{Bo}\right)^{0,6}} - 273,15 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10.6)$$

Postup při určování teploty spalin na výstupu z ohniště není jednoduchý, neboť určité parametry užívané při výpočtu jsou na této teplotě závislé, a proto se doporučuje před zahájením výpočtu teplotu spalin na výstupu z ohniště zvolit, pak pomocí ní vyjádřit potřebné parametry a následně vypočítat konečnou teplotu spalin na výstupu z ohniště. Pokud je vypočtená teplota  $t_{ok}$  v toleranci  $\pm 50^\circ\text{C}$ , lze tuto hodnotu považovat za správnou. Pro můj výpočet jsem zvolil teplotu  $t_{ok} = 912^\circ\text{C}$ .

$$t_{ok} = \frac{1449,8925 + 273,15}{1 + 0,52 \cdot \left( \frac{0,9101}{1,1446} \right)^{0,6}} - 273,15 = 912,553^\circ\text{C} \doteq 913^\circ\text{C}$$

Vypočtena teplota na výstupu z ohniště je  $913^\circ\text{C}$ , což je hodnota, která se liší od mé zvolené teploty o  $1^\circ\text{C}$ , čili se nacházím v toleranci  $\pm 50^\circ\text{C}$  a považuji tuto teplotu za správnou.

### 10.2.2 Teplota nechlazeného plamene

Tato teplota je definována jako teoretická adiabatická spalovací teplota, tj. teplota, která by byla v plameni, pokud by z něho nebylo odváděno teplo. Stanovit ji lze z celkového užitečného tepla uvolněného v ohniště  $Q_u$ , které je dáno součtem veškerých tepel uvolněných v ohništi z paliva, ze vzduchu a případně z recirkulovaných spalin.

$$Q_u = Q_{ired} \cdot \frac{100 - Z_{co} - Z_c - Z_{\text{f}}}{100 - Z_c} + Q_{vz} - Q_{CZ} + Q_S^{\text{r}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (10.7)$$

$$Q_u = 12537,9 \cdot \frac{100 - 0,5 - 7,9755 - 0,9301}{100 - 7,9755} + 126,0003 = 12469,0559 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

kde	$Q_{ired}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je redukováná výhřevnost paliva
	$Z_{co}$	$[\%]$	je ztráta hořlavinou ve spalinách
	$Z_c$	$[\%]$	je ztráta hořlavinou v tuhých zbytcích
	$Z_{\text{f}}$	$[\%]$	je ztráta fyzickým teplem tuhých zbytků
	$Q_{vz}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je teplo přivedené ve vzduchu
	$Q_{CZ}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je teplo přivedené v cizím zdroji
	$Q_S^{\text{r}}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je teplo zahrnuté v recirkulovaných spalinách

V mém případě neuvažuji s teplem přivedeným v cizím zdroji (parním ohřívákem vzduchu) a nevyužívám ani recirkulaci spalin, tudíž do výpočtu nezahrnuju ani teplo v recirkulovaných spalinách.

### Teplo přivedené ve vzduchu

$$Q_{vz} = O_{vv} \cdot i_{vz} = 4,7771 \cdot 26,3760 = 126,0003 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (10.8)$$

kde  $O_{vv}$  [ $\text{m}^3_{\text{N}} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je skutečné množství vlhkého spalovacího vzduchu  
 $i_{vz}$  [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ] je entalpie přivedeného vzduchu

### Entalpie přivedeného vzduchu

$$i_{vz} = c_{p_{vv}} \cdot t_{vz} = 1,3188 \cdot 20 = 26,3760 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \quad (10.9)$$

kde  $c_{p_{vv}}$  [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu  
 $t_{vz}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ] je teplota vzduchu

### Měrná tepelná kapacita vlhkého vzduchu

$$c_{p_{vv}} = c_{p_{vs}} + 0,0016 \cdot d \cdot c_{p_{\text{H}_2\text{O}}} \quad [\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (10.10)$$

$$c_{p_{vv}} = 1,2977 + 0,0016 \cdot 8,7053 \cdot 1,4959 = 1,3188 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$$

kde  $c_{p_{vs}}$  [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita suchého vzduchu při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  [1, str. 48]  
 $d$  [ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] je obsah vody na 1kg suchého vzduchu  
 $c_{p_{\text{H}_2\text{O}}}$  [ $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ ] je měrná tepelná kapacita vodní páry při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$  [1, str. 47]

### Obsah vody na 1kg suchého vzduchu

$$d = (\chi_v - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = (1,014 - 1) \cdot \frac{0,804}{1,293} \cdot 10^3 = 8,7053 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (10.11)$$

kde  $\chi_v$  [1] je podíl vodní páry na 1  $\text{m}^3_{\text{N}}$  suchého vzduchu

V případě, že kotel nemá recirkulaci spalin, je entalpie spalin rovna celkovému užitečnému teplu uvolněnému v ohništi  $I_{np}^{t_{np}, \alpha} = Q_u$ . Pro takto vypočtenou entalpii při přebytku vzduchu ve spalovací komoře  $\alpha$  je možné z I-t diagramu spalin nebo z tabulky určit teplotu nechlazeného plamene  $t_{np}$  [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Pro vypočtenou hodnotu entalpie spalin  $I_{np}^{t_{np}, \alpha} = 12469,0559 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  jsem interpolací určil teplotu nechlazeného plamene  $t_{np} = 1449,8925 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 10.2.3 Boltzmannovo číslo

$$Bo = \frac{\varphi \cdot M_{pv} \cdot (O_S \bar{c}_S)_0}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot \bar{\psi} \cdot S_{st} \cdot (273 + t_{np})^3} \quad [1] \quad (10.12)$$

$$Bo = \frac{0,9831 \cdot 3,6550 \cdot 9,3473}{5,68 \cdot 10^{-11} \cdot 0,4050 \cdot 249,3450 \cdot (273 + 1449,8925)^3} = 1,1446$$

kde	$\varphi$	[1]	je součinitel uchování tepla
	$M_{pv}$	$[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$	je množství paliva skutečně spáleného
	$(O_S \bar{c}_S)_0$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$	je střední tepelná jímavost spalin v ohništi
	$\bar{\psi}$	[1]	je střední hodnota součinitele tepelné efektivity
	$S_{st}$	$[\text{m}^2]$	je celkový povrch stěn ohniště vč. výstupního otvoru
	$t_{np}$	$[\text{ }^{\circ}\text{C}]$	je teplota nechlazeného plamene

### Součinitel uchování tepla

$$\varphi = 1 - \frac{Z_{sv}}{\eta_k + Z_{sv}} = 1 - \frac{1,4}{81,2402 + 1,4} = 0,9831 \quad [1] \quad (10.13)$$

kde	$Z_{sv}$	[%]	je ztráta sdílením tepla do okolí sáláním a vedením
	$\eta_k$	[%]	je tepelná účinnost kotle

### Střední tepelná jímavost spalin v ohništi

$$(O_S \bar{c}_S)_0 = \frac{Q_u - I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}}{t_{np} - t_{ok}} = \frac{12469,0559 - 7441,1916}{1449,8925 - 912} = 9,3473 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (10.14)$$

kde	$Q_u$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je teplo uvolněné ve spalovací komoře
	$I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}$	$[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$	je entalpie spalin na výstupu z ohniště pro $t_{ok} = 912 \text{ }^{\circ}\text{C}$
	$t_{np}$	$[\text{ }^{\circ}\text{C}]$	je teplota nechlazeného plamene
	$t_{ok}$	$[\text{ }^{\circ}\text{C}]$	je teplota spalin na výstupu z ohniště

### 10.2.4 Součinitel M

Součinitel M závisí na poloze maximální teploty plamene  $x_{pl}$  a na druhu spalovaného paliva. Při spalování v silné vrstvě na pevném nebo pohyblivém roštu se bere  $x_{pl} = 0,14$ . Pro spalování tuhých paliv s velkým podílem prchavé hořlaviny a pro spalování všechny druhů tuhých paliv ve vrstvě se počítá dle následujícího vztahu:

$$M = 0,59 - 0,5 \cdot x_{pl} = 0,59 - 0,5 - 0,14 = 0,52 \quad [1] \quad (10.15)$$

### 10.2.5 Součinitel tepelné efektivity stěn

Je dán vztahem:

$$\bar{\psi} = x \cdot \zeta = 0,9 \cdot 0,45 = 0,4050 \quad [1] \quad (10.16)$$

kde	$x$	[1]	je úhlový součinitel osálení stěn, určen dle literatury [1, str. 85]
	$\zeta$	[1]	je součinitel zanesení stěn ohniště, určen dle literatury [1, str. 86]

### 10.2.6 Stupeň černosti ohniště

Vyjadřuje sálavé vlastnosti plamene a stěn ohniště a pro roštové ohniště se určí dle vztahu:

$$a_0 = \frac{a_{pl} + (1 - a_{pl}) \cdot \frac{R}{S_{st}}}{1 - (1 - a_{pl}) \cdot (1 - \bar{\psi}) \cdot \left(1 - \frac{R}{S_{st}}\right)} \quad [1] \quad (10.17)$$

$$a_0 = \frac{0,7782 + (1 - 0,7782) \cdot \frac{28,9884}{249,3450}}{1 - (1 - 0,7782) \cdot (1 - 0,4050) \cdot \left(1 - \frac{28,9884}{249,3450}\right)} = 0,9101$$

kde	$a_{pl}$	[1]	je stupeň černosti plamene
	$R$	[m <sup>2</sup> ]	je plocha hořící vrstvy na roštu
	$S_{st}$	[m <sup>2</sup> ]	je celkový povrch stěn ohniště vč. výstupního otvoru
	$\bar{\psi}$	[1]	je střední hodnota součinitele tepelné efektivity stěn



### Efektivní stupeň černosti plamene

$$a_{pl} = 1 - e^{-k \cdot p \cdot s} = 1 - e^{-3,09570 \cdot 1,4 \cdot 8,653} = 0,7782 \quad [1] \quad (10.18)$$

kde	e	[1]	je základ přirozených logaritmů
	k	$[m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$	je součinitel zeslabení sálání
	p	[MPa]	je tlak spalin v ohništi
	s	[m]	je účinná tloušťka sálavé vrstvy

### Plocha hořící vrstvy na roštu

$$R = a \cdot b = 4,06 \cdot 7,14 = 28,9884 \text{ m}^2 \quad (10.19)$$

kde	a	[m]	je šířka spalovací komory
	b	[m]	je hloubka spalovací komory

### Součinitel zeslabení sálání

$$k = k_s \cdot r_s + k_p \cdot \mu_{pk} + 10 \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_2 \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}] \quad (10.20)$$

$$k = 1,1044 + 1,8413 + 10 \cdot 0,5 \cdot 0,03 = 3,0957 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

kde	$k_s \cdot r_s$	$[m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$	je součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny
	$k_p \cdot \mu_{pk}$	$[m^{-1} \cdot MPa^{-1}]$	je součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi
	$\kappa_1$	[1]	je součinitel závislý na druhu paliva, voleno dle [1]
	$\kappa_2$	[1]	je součinitel závislý na způsobu spalování, voleno dle [1, str. 91]

### Součinitel zeslabení sálání tříatomovými plyny

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{2,49 + 5,11 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{p_s \cdot s}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{t_{ok} + 273,15}{1000} \right) \cdot r_s [m^{-1} \cdot MPa^{-1}] \quad (10.21)$$

$$k_s \cdot r_s = \left( \frac{2,49 + 5,11 \cdot 0,1258}{\sqrt{0,0243 \cdot 4,8653}} - 1,02 \right) \cdot \left( 1 - 0,37 \cdot \frac{912 + 273,15}{1000} \right) \cdot 0,2432 = 1,1044 \text{ m}^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

kde	$r_{H_2O}$	[1]	je objemové podíl vody ve spalinách
	$r_s$	[1]	je objemový podíl tříatomových plynů ve spalinách
	$p_s$	[MPa]	je parciální tlak tříatomových plynů ve spalinách
	s	[m]	je účinná tloušťka sálavé vrstvy
	$t_{ok}$	[°C]	je teplota spalin na výstupu z ohniště

### Součinitel zeslabení sálání popílkovými částicemi

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot \mu_{pk}}{\sqrt[3]{(t_{ok} + 273,15)^2 \cdot d_{pk}^2}} \quad [m^{-1} \cdot MPa^{-1}] \quad (10.22)$$

$$k_p \cdot \mu_{pk} = \frac{5,7 \cdot 10^4 \cdot 0,0267}{\sqrt[3]{(912 + 273,15)^2 \cdot 20^2}} = 1,8413 m^{-1} \cdot MPa^{-1}$$

kde	$\mu_{pk}$	$[kg \cdot kg^{-1}]$	je koncentrace popela ve spalínách
	$t_{ok}$	$[^{\circ}C]$	je teplota spalin na výstupu z ohniště
	$d_{pk}$	$[\mu m]$	je střední efektivní průměr části popílku

### Objemový podíl tříatomových plynů ve spalínách

$$r_{H_2O} = \frac{O_{H_2O}^S + (\chi_v - 1) \cdot (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} \quad [1] \quad (10.23)$$

$$r_{H_2O} = \frac{0,6470 + (1,014 - 1) \cdot (1,4 - 1) \cdot 3,4122}{3,9309 + (1,4 - 1) \cdot 3,4122} = 0,1258$$

kde	$O_{H_2O}^S$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je objem vodní páry v minimálním objemu vlhkých spalin
	$\chi_v$	$[1]$	je podíl vodní páry na $1 m^3_N$ suchého vzduchu
	$\alpha_{ok}$	$[1]$	je přebytek vzduchu ve spalovací komoře
	$O_{VVmin}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva
	$O_{SVmin}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je minimální objem vlhkých spalin

$$r_{RO_2} = \frac{O_{CO_2} + O_{SO_2}}{O_{SVmin} + (\alpha_{ok} - 1) \cdot O_{VVmin}} = \frac{0,6164 + 0,0055}{3,9309 + (1,4 - 1) \cdot 3,4122} = 0,1174 [1] \quad (10.24)$$

kde	$O_{CO_2}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je objem $CO_2$ ve spalínách
	$O_{SO_2}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je objem $SO_2$ ve spalínách
	$\alpha_{ok}$	$[1]$	je přebytek vzduchu ve spalovací komoře
	$O_{VVmin}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je minimální objem vlhkého vzduchu potřebný pro dokonalé spálení 1kg paliva
	$O_{SVmin}$	$[m^3_N \cdot kg^{-1}]$	je minimální objem vlhkých spalin

$$r_S = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,1258 + 0,1174 = 0,2432 \quad [1] \quad (10.25)$$

### Účinná tloušťka sálavé vrstvy

$$s = 3,6 \cdot \frac{V_0}{S_{st}} = 3,6 \cdot \frac{336,980}{249,345} = 4,8653 \text{ m} \quad (10.26)$$

kde  $V_0$   $[\text{m}^3]$  je objem spalovací komory  
 $S_{st}$   $[\text{m}^2]$  je celkový povrch stěn ohniště vč. výstupního otvoru

### 10.2.7 Množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn

$$Q_s = \varphi \cdot (Q_u - I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}) = 0,9831 \cdot (12469,0559 - 7441,1916) = 4942,6878 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad (10.27)$$

kde  $\varphi$   $[1]$  je součinitel uchování tepla  
 $Q_u$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je teplo uvolněné ve spalovací komoře  
 $I_S^{t_{ok}, \alpha_{ok}}$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je entalpie spalin na výstupu z ohniště pro  $t_{ok}=912^\circ\text{C}$

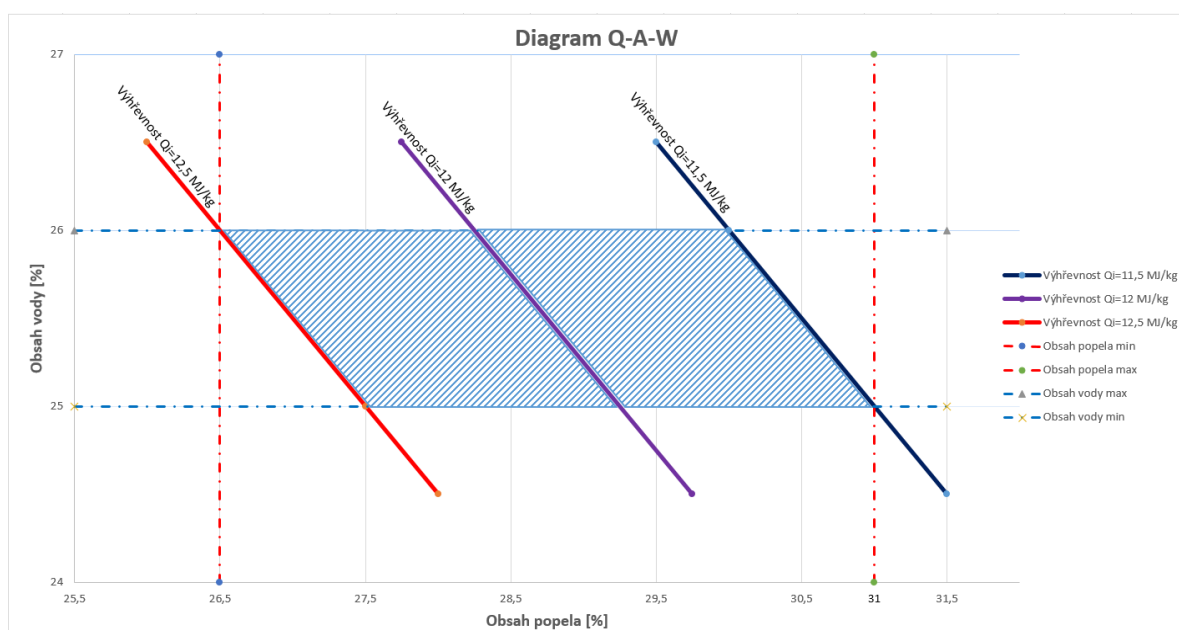
### Střední tepelné zatížení stěn ohniště

$$\bar{q} = \frac{Q_s \cdot M_{pv}}{S_{ús}} = \frac{4942,6878 \cdot 3,6550}{224,4110} = 80,5020 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \quad (10.28)$$

kde  $Q_s$   $[\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}]$  je množství tepla odevzdaného v ohništi do stěn  
 $M_{pv}$   $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$  je množství paliva skutečně spáleného  
 $S_{ús}$   $[\text{m}^2]$  je účinná sálavá plocha stěn ohniště

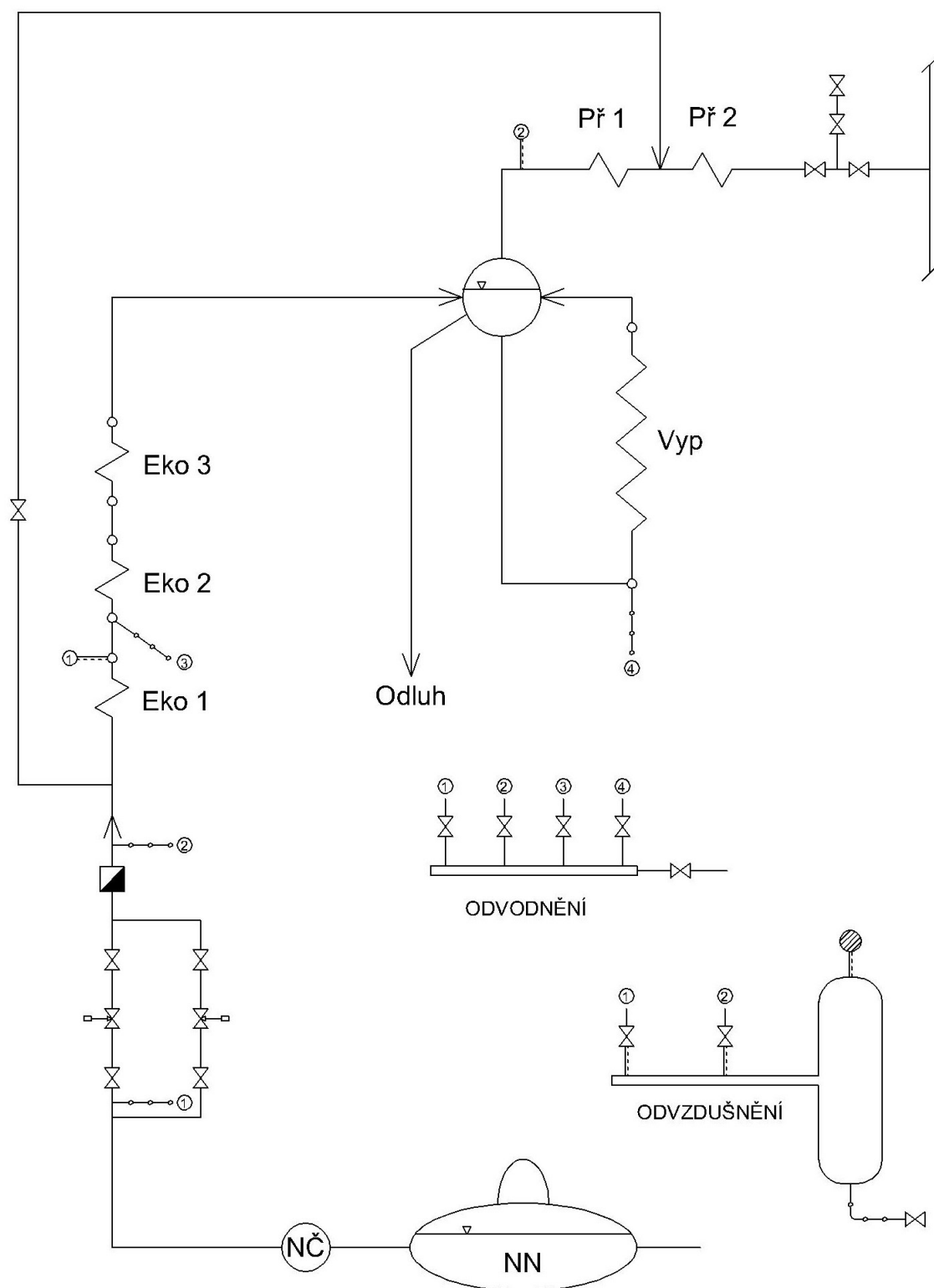
## 11 DIAGRAM PALIVA Q-A-W

Pro veškerá paliva uvnitř šrafované plochy musí být kotel schopen trvalého spolehlivého provozu, ovšem garantované parametry (účinnost) budou dodrženy jen při spalování garančního (sjednaného) paliva. Garanční palivo je fiktivní palivo, které se při garančních zkouškách nebude spalovat a musí ležet uvnitř šrafované plochy. Pokud při garančních zkouškách bude spalované palivo ležet mimo šrafovanou oblast a garantované parametry nebudou dosaženy, tak se garanční test musí opakovat s předepsaným palivem. Při garančních zkouškách s palivem, které leží uvnitř šrafované plochy, se naměřené hodnoty garantovaných parametrů přepočítají na sjednané garanční palivo.



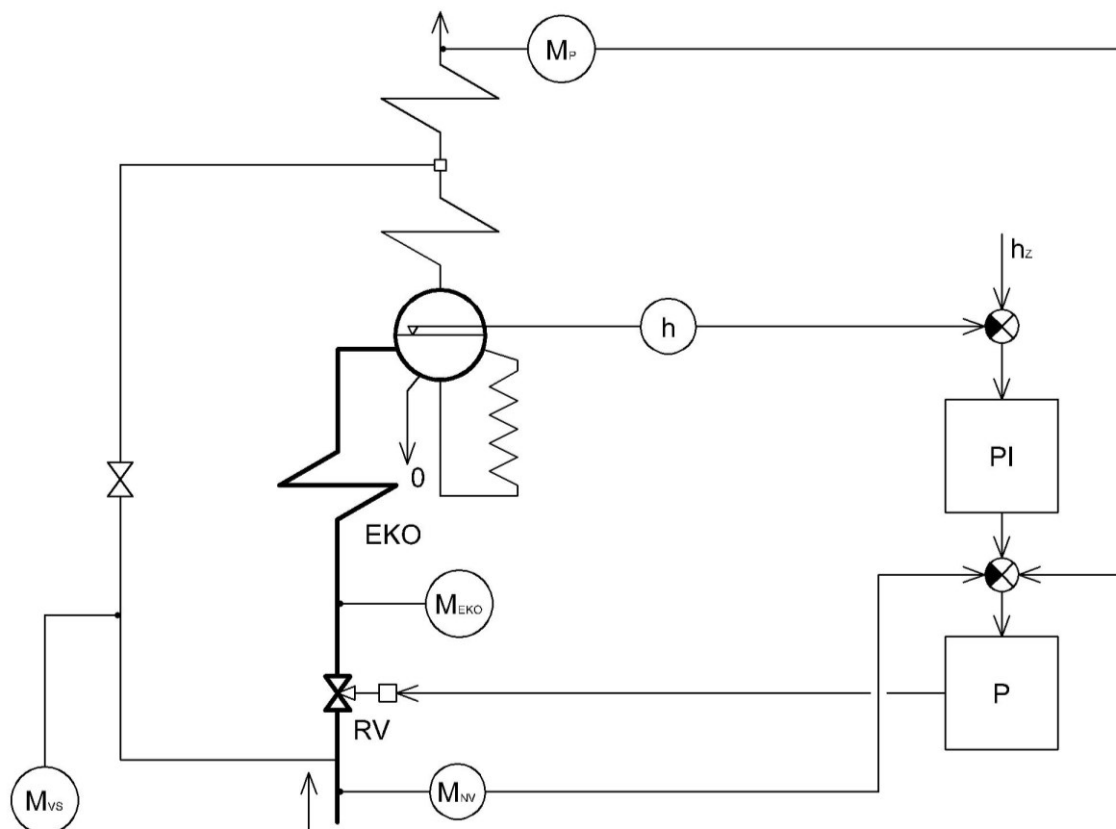
Obr. 11. 1 Diagram paliva

## 12 SCHÉMA ZAPOJENÍ VÝPARNÍKU



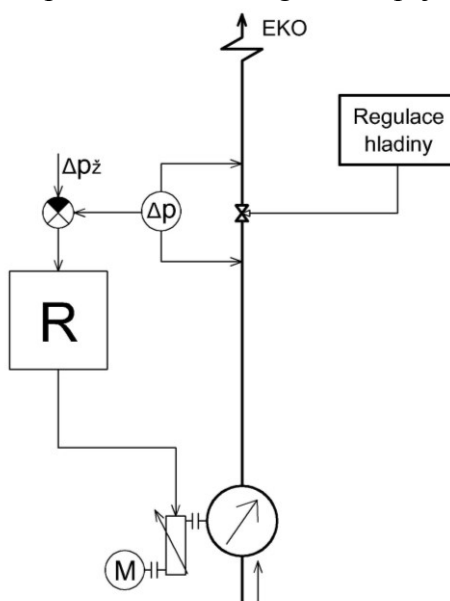
Obr. 12. 1 Schéma zapojení výparníku

### 13 SCHÉMA REGULACE NAPÁJENÍ



Obr. 13. 1 Schéma regulace napájení [7]

Pokud by se při rekonstrukci vyměnila napáječka za novou s regulací otáček, pak doporučuji pro regulaci hladiny ponechat jako akční člen regulační ventil a otáčkami napáječky udržovat konstantní tlakový spád na regulačním ventilu. Uvádí se, že pro regulaci napájení má regulační ventil lepší vlastnosti. Tímto zapojením se zachovají podmínky pro lepší regulaci i při ekonomické regulaci napájení změnou otáček.



Obr. 13. 2 Regulace konstantního tlakového spádu na RV napájení [7]

## 14 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo přepočítat spalovací komoru na nové palivo a stanovit nové parametry při spalování tohoto paliva. Nejedná se tedy o návrh kotle, ale o přepočet kotle. V průběhu zpracování diplomové práce došlo ke změně rozsahu rekonstrukce ze strany provozovatele kotle a od záměru vyměnit starý rošt za nový se upustilo. Tuto změnu postupu provozovatele kotle respektuji a ponechávám spalovací komoru nezměněnou, tzn., že stěny spalovací komory sestávají z varných trubek a nedochází tedy k jejich záměně za membránové stěny. Zůstává i původní rošt, u kterého se provedla pouze výměna jeho dožitých částí. Nemění se tedy ani dosažitelná účinnost spalování.

V diplomové práci jsem nejprve provedl stechiometrické výpočty pro dvě paliva, a to pro palivo 1 s výhřevností  $Q_i^r = 11500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a pro palivo 2 s výhřevností  $Q_i^r = 12500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Následně jsem provedl porovnání množství spalovacího vzduchu a množství spalin vzniklých při spalování obou těchto paliv, viz Obr. 5. 2. Z předchozího výpočtu vyplývá, že při spalování různých druhů paliv se mění množství vzniklých spalin i množství spalovacího vzduchu. Z toho plyne, že při spalování paliva 2 bude větší průtok spalin, což se projeví větší intenzitou abraze na teplosměnných plochách. Dále větší průtok spalin znamená, že se zvětší rychlost proudění spalin, a tím se zvětší tepelný výkon u konvekčních ploch, což znamená, že se musí změnit i regulace vstřikem napájecí vody.

V další části jsem stanovil obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích při spalování obou paliv, kde jsem rovněž uvedl porovnání stavu u obou paliv, viz Obr. 7. 4. Poslední výpočtovou část, kterou jsem provedl pro dvě paliva je tepelná bilance kotle. Zde jsem provedl porovnání jednotlivých ztrát kotle, viz Obr. 9. 1. Dále jsem porovnal účinnost kotle při spalování paliva 1 a paliva 2, viz Obr. 9. 2 a v poslední řadě jsem porovnal množství přivedeného a skutečně spáleného paliva, viz Obr. 9. 3, kde je na tomto obrázku vidět, že při spalování paliva 2 klesne spotřeba samotného paliva, a tím poklesne i množství produkovaných škodlivin při spalování, např. nižší produkce škodlivin CO, SO<sub>2</sub> a nižší produkce CO<sub>2</sub>.

Poslední výpočtovou částí v mé diplomové práci, kterou jsem se zabýval, byl výpočet, resp. přepočet spalovací komory. Pro tento výpočet jsem použil palivo 2. Výstupem tohoto výpočtu bylo stanovení teploty na výstupu ze spalovací komory, která mi vyšla 913°C, což je na dnešní poměry poměrně nízká hodnota. Pokud by se měl navrhnout nový kotel s novou spalovací komorou, bylo by dobré provést spalovací komoru menších rozměrů kvůli zvýšení teploty na výstupu z ní, tím by se samozřejmě musely upravit i navazující plochy přehříváku páry a ekonomizéru.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ladislav Vilimec za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Ostravě: 9. 5. 2014



(podpis autora)



## 15 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DLOUHÝ, Tomáš. *Výpočty kotlů a spalinových výměníků*. Skripta ČVUT Praha, 2002. ISBN 80-01-02591-8.
- [2] ČERNÝ, Václav, Jiří TEYSSLER a Břetislav JANEBA. *Parní kotle*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury (SNTL), 1983. 858 s.
- [3] POLÁCH, Vladislav. *Parní kotle*. Plzeň: ZČU, Fakulta strojní, 2011. 79 s. Dostupné z: [http://www.kke.zcu.cz/\\_files/projekty/enazp/Parni\\_kotle.doc](http://www.kke.zcu.cz/_files/projekty/enazp/Parni_kotle.doc)
- [4] KUBISZ, Pavel. *Návrh experimentálního reaktoru pro výzkum spalování biomasy v pevném lóži* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: [http://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=28084](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=28084). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Vít Kermes, Ph.D.
- [5] RAFAKO S. A. – *prospekt Kotlů*. RACIBÓRZ: Rafako s. a., 2012. 37 s.
- [6] ON 07 0417 *Tepelný výpočet parných kotlov*. Praha, 1984.
- [7] VILIMEC, Ladislav. *Řízení a regulace energetických zařízení*. Ostrava: VŠB-TU, 2008. ISBN 978-80-248-1853.
- [8] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. I. díl. Ostrava: VŠB-TU, 1997. ISBN 80-7078-427-X.
- [9] VILIMEC, Ladislav. *Stavba kotlů*. II. díl. Ostrava: VŠB-TU, 1999. ISBN 80-7078-681-7.
- [10] VENHODA, Tomáš. *Technologie pro přípravu a spalování biomasy* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-04-23]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/18058/Venhoda,%20T.\\_Technologie%20pro%20pripravu%20a%20spalovani%20biomasy.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/18058/Venhoda,%20T._Technologie%20pro%20pripravu%20a%20spalovani%20biomasy.pdf?sequence=1). Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Tomáš Juřena.
- [11] ZEKIČ, Daniel. *Roštový kotel na spalování peletek* [online]. Brno, 2008 [cit. 2014-04-04]. Dostupné z: [https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/15599/diplomova%20prace\\_ZEKI%C4%8C.pdf?sequence=1](https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/15599/diplomova%20prace_ZEKI%C4%8C.pdf?sequence=1). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Richard Brobely.

## 16 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 2. 1 Hlavní části roštového ohniště [3].....	14
Obr. 2. 2 Rozložení plamene nad roštem [2].....	15
Obr. 2. 3 Tvar roštového ohniště [2].....	16
Obr. 2. 4 Celková délka $L_c$ , účinná délka $L_u$ a pomocná délka roštu ( $L_s$ – sušení, $L_d$ – dohořívání) [2].....	17
Obr. 2. 5 Roštnice pevného rovinného roštu [2].....	19
Obr. 2. 6 Rovinný rošt se sklopnými roštnicemi [2].....	19
Obr. 2. 7 Pevný stupňovitý rošt [2].....	20
Obr. 2. 8 Pásový rošt [4].....	21
Obr. 2. 9 Pohyb pásu při mechanickém pohazování [2].....	21
Obr. 2. 10 Pohyb pásu při pneumatickém pohazování [2].....	21
Obr. 2. 11 Kotel typu OR-35N s pásovým roštem firmy Rafako [5].....	22
Obr. 2. 12 Přesuvný rošt [4].....	23
Obr. 2. 13 Vratisuvný rošt [4].....	23
Obr. 2. 14 Válcový rošt pro spalování městských odpadů [1].....	24
Obr. 4. 1 Diagram spalín.....	35
Obr. 5. 1 Diagram spalín.....	46
Obr. 5. 2 Porovnání množství spalín a vzduchu.....	46
Obr. 6. 1 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $K_s = 8\%$ .....	48
Obr. 6. 2 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $K_s = 9\%$ .....	49
Obr. 6. 3 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $X_{str} = 65\%$ .....	49
Obr. 7. 1 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $K_s = 8\%$ .....	51
Obr. 7. 2 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $K_s = 9\%$ .....	52
Obr. 7. 3 Obsah spalitelných látek v tuhých zbytcích, $X_{str} = 65\%$ .....	52
Obr. 7. 4 Porovnání obsahu spalitelných látek v tuhých zbytcích.....	53
Obr. 9. 1 Porovnání jednotlivých ztrát kotle.....	64
Obr. 9. 2 Porovnání účinností kotle.....	64
Obr. 9. 3 Porovnání množství přivedeného a skutečně spáleného paliva.....	65
Obr. 10. 1 Zjednodušené schéma spalovací komory.....	67
Obr. 11. 1 Diagram paliva.....	76
Obr. 12. 1 Schéma zapojení výparníku.....	77
Obr. 13. 1 Schéma regulace napájení [7].....	78
Obr. 13. 2 Regulace konstantního tlakového spádu na RV napájení [7].....	78

## 17 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 3. 1 Prvkové složení a výhřevnost paliv .....	25
Tab. 3. 2 Zadané parametry .....	25
Tab. 4. 1 Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce [1].....	30
Tab. 4. 2 Entalpie složek spalin.....	34
Tab. 4. 3 Entalpie spalin .....	35
Tab. 5. 1 Konstanty pro Rosinovy – Freslingovy vzorce [1].....	40
Tab. 5. 2 Entalpie složek spalin.....	44
Tab. 5. 3 Entalpie spalin .....	45

## **18 SEZNAM PŘÍLOH**

Výkres spalovací komory